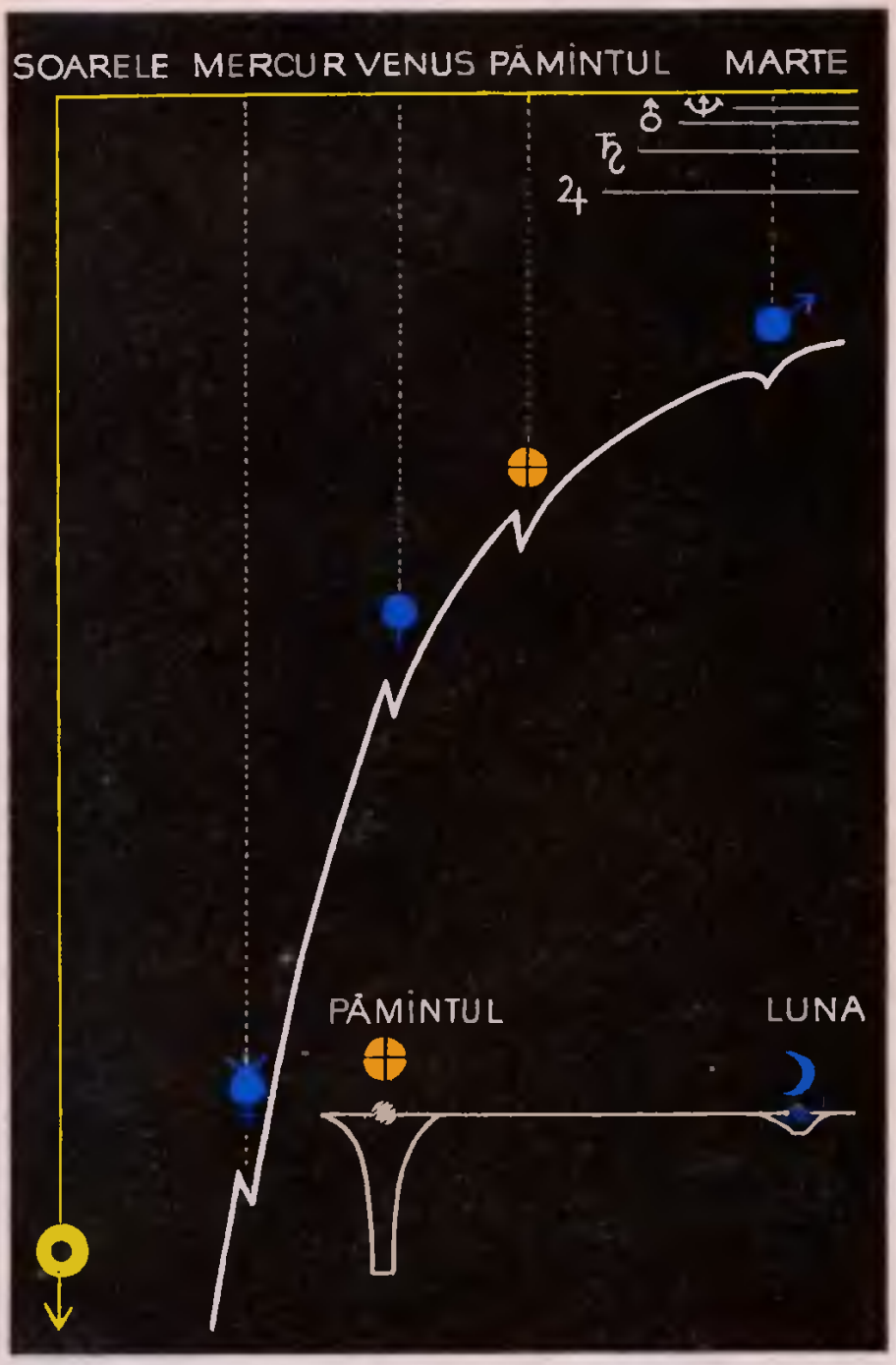
GEORGE GAMOW



GRAVITAȚIA

EDITURA ȘTIINȚIFICĂ

IN ROMÂNEŞTE DE ING. D. MARINESCU

GEORGE GAMOW
PROFESOR LA UNIVERSITATEA DIN COLORADO

GRAVITAŢIA

ILUSTRATĂ DE AUTOR

EDITURA ŞTIINŢIFICĂ
BUCUREŞTI 1966

COPERTA DE

ION PETRESCU

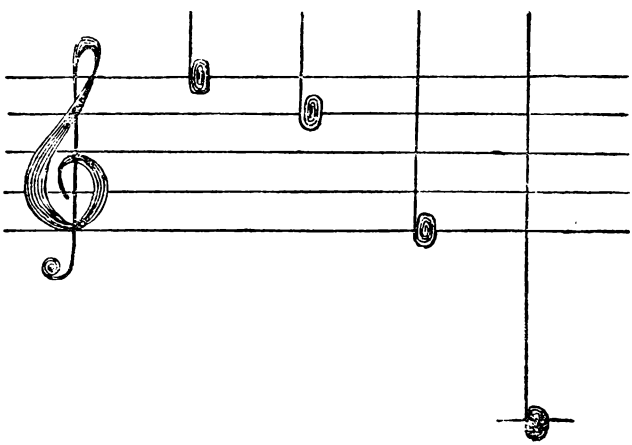
GRAVITY

by

GEORGE GAMOW

Published by Anchor Books
Doubleday & Company, Inc.
New York

LUI QUIGG NEWTON
CARE ÎMI CITEȘTE TOATE CĂRȚILE



BIOGRAFIA AUTORULUI

În 1954, dr. George Gamow, care se specializase pînă atunci în aplicațiile fizicii nucleare în astrofizică și cosmologie, a lansat ideea posibilității de aplicare a matematicii la studiul celulei vii și a trasat astfel liniile generale ale unei metode de cercetare a acidului dezoxiribonucleic, metodă care s-a dovedit a fi deosebit de importantă pentru cercetările de genetică. Acest episod al activității dr-lui Gamow, care îmbrățișează fizica nucleară, astrofizica, cosmologia, matematica, chimia și biologia, ilustrează multilateralitatea preocupărilor sale științifice, dar nu epuizează varietatea aspectelor spiritului său.

Criticii literari din Statele Unite și Anglia l-au proclamat cel mai bun popularizator în viață al științei, au savurat fanteziile sale științifice și au descoperit în scrierile sale o oarecare poezie. De obicei, reputația cîștigată în știință sau în literatură e socotită ca o realizare suficientă pentru activitatea unui om, dar dr. Gamow nu s-a oprit aici. Cititorii acestor pagini vor avea plăcutul prilej să constate că dr. Gamow a abordat și artele plastice, inspirîndu-se în mod imparțial atît din povestirile în imagini (*comics*) apărute în edițiile de duminică ale gazetelor, cît și din capodoperele lui Botticelli. [Dacă la prima vedere nu descoperiți influența lui Botticelli în portretul lui Albert Einstein de la pag. 93 (fig. 23) făcută de dr. Gamow, aveți cel puțin asigurarea autorului că această influență

există.] În toate aceste domenii diferite de creație, dr. Gamow a fost aproape la fel de prolific.

Dr. Gamow s-a născut la 4 martie 1904 la Odessa, în Rusia. În prima perioadă a tinereții s-a dedicat științei și a studiat timp de un an paleontologia. După cum s-a exprimat el mai tîrziu, din aceste studii a învățat „să deosebească un dinozaur de o pisică după forma degetului mic de la picior". A învățat la Universitatea din Leningrad, pe care a absolvit-o în 1928, cu diploma de doctor în filozofie, și a studiat un an la Universitatea din Göttingen, în Germania, ca bursier al statului în străinătate. În 1928—1929 a lucrat cu Niels Bohr la Copenhaga, iar în 1929—1930 cu Ernest Rutherford, la Laboratorul Cavendish din Cambridge, Anglia.

Dr. Gamow avea 24 de ani cînd a adus prima contribuție mai importantă în fizica teoretică. Concomitent, dar independent unii de alții, Gamow, fizicianul american E. U. Condon și fizicianul englez R. W. Gurney, au explicat emisia de particule alfa din nucleele radioactive, aplicînd acestui proces metodele mecanicii ondulatorii, care pe atunci erau noi. Doi ani mai tîrziu, în 1930, el a prezis — ceea ce s-a și adeverit — că protonii vor fi mai utili decît particulele alfa în experiențele de „dezagregare a atomului" și, în același an, a emis ideea modelului în formă de picătură pentru nucleele elementelor grele. În 1929 a colaborat cu R. Atkinson și F. Houtermans la formularea teoriei după care căldura și lumina Soarelui provin din procesele termonucleare care au loc în acesta, iar teoria sa asupra originii elementelor chimice, bazată pe captura de neutroni, a dominat gîndirea cosmologică între 1940 și 1950. Contribuția lui Gamow la teoria acidului dezoxiribonucleic constă în ipoteza că cei patru nucleotizi ai moleculei de acid dezoxiribonucleic formează un fel de cod.

ale cărui diferite combinații joacă rolul de șablon în organizarea diferitelor molecule de aminoacizi.

Caracteristicile personale ale dr-ului Gamow sînt aproape tot atît de impresionante ca și realizările sale creatoare. De statură uriașă, avînd peste 1,90 m și o greutate de mai bine de 100 kg, el e înzestrat cu un umor diabolic, după cum prea bine știu cititorii fanteziilor d-lui *Tompkins*, creat de el. Cînd, în 1948, împreună cu R. Alpher, un student al său, și-au semnat calculele preliminare ale studiului intitulat *Originea elementelor chimice*, Gamow a făcut următoarea remarcă: „Lipsește ceva" și, atribuind lui Hans Bethe o parte din merit *in absentia*[1], a semnat lucrarea astfel: „Alpher, Bethe și Gamow"[2].

Dr. Gamow este un conferențiar neobosit; vorbește șase limbi cu accent străin foarte pronunțat, ceea ce a făcut pe unul dintre prietenii săi să afirme că cele șase limbi nu sînt decît dialecte diferite ale aceleiași limbi — limba „gamowiană".

Dr. Gamow face parte din corpul didactic al Universității din Boulder a statului Colorado: el a scris numeroase articole tehnice și o carte tehnică, *Nucleul atomic* (Oxford University Press, 1931), revăzută în 1937 și 1949. Lucrările sale de popularizare a științei cuprind numeroase articole publicate în revista „Scientific American" și următoarele cărți:

Mr. Tompkins in Wonderland (Dl. Tompkins în țara minunilor, 1939), *Mr. Tompkins Explores the Atom* (Dl. Tompkins explorează atomul, 1943), *Mr. Tompkins Learns the Facts of Life* (Dl. Tompkins învață adevărurile vieții, 1953), *Atomic Energy in Cosmic and Human Life* (Energia ato-

---

[1] Termen latinesc însemnînd „în lipsă". Marele savant atomist german Hans Bethe nu colaborase la lucrarea amintită. — *N. T.*

[2] Aceste nume sugerează primele litere ale alfabetului grecesc: alfa, beta și gamma. — *N. T.*

mică în viața cosmosului și a omului, 1945), *The Birth and Death of the Sun* (Nașterea și moartea Soarelui, 1941), *Biography of the Earth* (Biografia Pământului, 1943), *One, Two, Three... Infinity*[1] (Unu, doi, trei... infinit, 1947), *Creation of the Universe* (Formarea Universului, 1952), *Puzzle Math* (Enigme matematice[2], în colaborare cu M. Stern, 1958), *The Moon* (Luna, 1953), *Matter, Earth and Sky* (Materie, Pământ și cer, 1958), *Physics: Foundation and Frontiers* (Fizica: bazele și limitele ei, în colaborare cu J. Cleveland, 1960), *Atom and Its Nucleus* (Atomul și nucleul său, 1961), *Biography of Physics* (Biografia fizicii, 1961).

Cel de-al doilea război mondial a întrerupt activitatea de pregătire a ilustrațiilor pentru a doua carte din seria *Dl. Tompkins*. În 1956 i s-a decernat de către UNESCO premiul Kalinga pentru popularizarea științei.

În prezent, dr. Gamow este membru al Academiei Daneze de Științe și al Academiei Naționale de Științe a Statelor Unite.

---

[1] Vezi M. Gamow, ***Unu, doi, trei... infinit,*** Editura Tineretului, București, 1958. — *N. R.*

[2] Vezi M. Gamow și M. Stern, ***Enigme matematice,*** Editura Științifică, București, 1961. — *N. R.*

PREFAȚĂ

Gravitația este legea supremă a universului. Ea ține adunate laolaltă cele o sută de miliarde de stele din Calea Laptelui; ea face ca Pămîntul să se rotească în jurul Soarelui iar Luna în jurul Pămîntului; datorită ei cad pe pămînt merele coapte și avioanele avariate. În istoria cunoștințelor omului despre gravitație figurează trei nume mari: Galileo Galilei, care a studiat pentru prima dată, în mod amănunțit, fenomenul căderii libere și cel al căderii dirijate; Isaac Newton, primul care a conceput gravitația ca o forță universală și Albert Einstein, care a spus că gravitația nu este altceva decît curbura „continuului" spațiu-timp cu patru dimensiuni.

În cartea de față vom urmări cele trei etape ale evoluției acestor idei, consacrînd un capitol muncii de pionierat a lui Galilei, șase capitole ideilor lui Newton și dezvoltării lor ulterioare, un capitol lui Einstein și un capitol speculațiilor făcute, de la Einstein încoace cu privire la relația dintre gravitație și alte fenomene fizice. Atenția deosebită acordată clasicilor în această problemă se datorește faptului că teoria gravitației universale este în fond o teorie clasică. S-ar putea să existe o legătură ascunsă între gravitație, pe de o parte, și cîmpul magnetic și particulele de materie, pe de alta, dar nimeni nu poate spune astăzi ce fel de legătură este, după cum nu există nici un mijloc de a prezice cît timp va mai trece pînă ce se va face un progres important în această direcție.

Ocupîndu-se de partea „clasică" a teoriei gravitației, autorul a trebuit să ia o hotărîre importantă în ce privește folosirea aparatului matematic. Cînd Newton a conceput prima oară ideea gravitației universale, matematica nu era încă destul de dezvoltată pentru a-i permite să urmărească toate consecințele ideilor sale în domeniul astronomiei. Newton a trebuit să elaboreze și sistemul matematic corespunzător, cunoscut astăzi sub numele de calcul diferențial și integral, mai cu seamă pentru a putea rezolva problemele pe care le ridica teoria gravitației universale elaborată de el. Prin urmare, era firesc ca în lucrarea de față să se facă o scurtă expunere a principiilor elementare ale calculului infinitezimal, fapt care explică numărul relativ mare de formule de matematică din capitolul III.

Cititorii care se încumetă să se concentreze asupra acestui capitol vor profita cu siguranță de acest prilej de a-și crea o bază matematică și pentru alte studii de fizică. Acest capitol poate fi însă omis de acei cititori pentru care formulele de matematică reprezintă o problemă, fără ca înțelegerea generală a subiectului tratat să fie afectată. Dacă însă vreți să învățați fizică, vă rog să încercați *să pricepeți capitolul III!*

GEORGE GAMOW

Universitatea din Colorado
13 ianuarie 1961

CUM CAD OBIECTELE

Noţiunea de „sus" şi „jos" e veche de cînd lumea, iar zicala că „orice urcuş are şi coborîş" ar fi putut fi născocită de un om de Neanderthal. Pe vremuri, cînd se credea că Pămîntul are forma unei tipsii, „sus" însemna direcţia „cerului", unde sălăşluiau zeii, iar „jos" era direcţia „lumii subpămîntene". Tot ce nu era de natură divină avea tendinţa naturală de a cădea în jos, aşa că un înger căzut din „cer" trebuia neapărat să ajungă în „iad". Deşi marii astronomi ai Greciei antice, cum au fost Eratostene şi Aristarh, au adus cele mai convingătoare argumente că Pămîntul e rotund, noţiunea de direcţii absolute „în sus" şi „în jos" s-a menţinut de-a lungul evului mediu şi a fost folosită în scopul de a ridiculiza ideea că Pămîntul ar putea fi sferic. Într-adevăr, se susţinea că dacă Pămîntul ar fi rotund, antipozii, adică oamenii care locuiesc pe partea opusă a globului, ar cădea în spaţiul gol de dedesubt şi, ceea ce ar fi mult mai rău, toată apa oceanelor s-ar scurge de pe Pămînt în aceeaşi direcţie.

Cînd, în sfîrşit, s-a stabilit prin călătoria lui Magellan în jurul lumii, în mod convingător pentru oricine că Pămîntul este sferic, a trebuit să se modifice noţiunea de „sus" şi „jos" ca direcţie absolută în spaţiu. S-a crezut că globul pămîntesc stă nemişcat în centrul universului, pe cînd toate corpurile cereşti, fiind legate de nişte sfere de cristal, se învîrtesc în jurul lui. Părinţii acestei concepţii despre univers sau a cosmologiei au fost astronomul grec

Ptolemeu și filozoful Aristotel. Ei au observat că mișcarea naturală a tuturor obiectelor materiale era îndreptată spre centrul Pămîntului, și numai focul, care avea ceva divin în el, sfida această regulă, ridicîndu-se în sus din lemnele care ard. Veacuri de-a rîndul, filozofia lui Aristotel și scolastica au dominat gîndirea omenească. La chestiunile științifice se răspundea cu argumente verbale și nu se făcea nici cea mai mică încercare să se verifice prin experiență directă dacă afirmațiile făcute sînt corecte sau nu. De exemplu, se credea că corpurile grele cad mai repede decît cele ușoare, dar nu posedăm nici un document din acea vreme care să arate că s-ar fi făcut vreo încercare în vederea studierii mișcării corpurilor în cădere. Filozofii de atunci susțineau că ochiul omenesc nu poate urmări căderea liberă, deoarece ea se desfășoară prea repede.

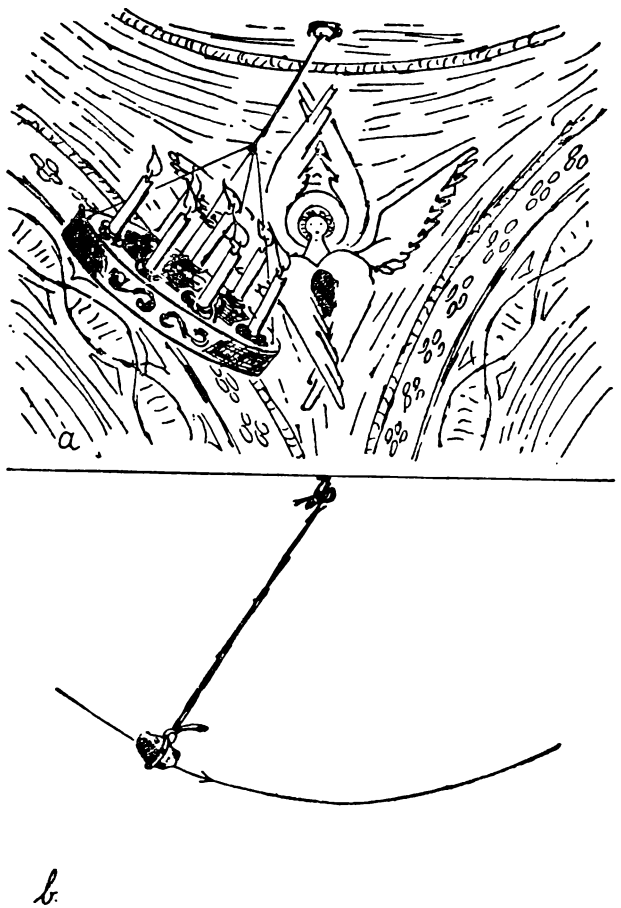
Prima abordare cu adevărat științifică a problemei căderii corpurilor a fost făcută de celebrul om de știință italian Galileo Galilei (1564—1642), într-o perioadă în care știința și arta începeau să se trezească din somnul adînc al evului mediu. Potrivit legendei pitorești, dar probabil neadevărată, începutul s-a făcut într-o zi cînd tînărul Galilei asista la liturghia în catedrala din Pisa și privea distrat un policandru care se balansa încolo și încoace, după ce paracliserul îl trăsese într-o parte pentru a-i aprinde lumînările (fig. 1). Galilei a observat că deși oscilațiile policandrului erau din ce în ce mai mici pe măsură ce acesta se apropia de poziția de repaus, durata fiecărei oscilații (perioada de oscilație) rămînea aceeași.

Întorcîndu-se acasă, el și-a propus să verifice această observație întîmplătoare cu ajutorul unei pietre atîrnate de o sfoară și să măsoare perioada de oscilație prin numărarea bătăilor pulsului său. Punîndu-și ideea în practică, a constatat că avusese dreptate: perioada rămînea aproape aceeași, deși oscilațiile aveau o amplitudine din ce în ce

mai mică. Fiind înzestrat cu o minte iscoditoare, Galilei a început o serie de experienţe, folosind pietre de diferite greutăţi şi sfori de diferite lungimi. Aceste studii l-au condus la o descoperire uimitoare. Deşi perioada de oscilaţie depindea de lungimea sforii (fiind mai lungă cînd sfoara era mai lungă), ea era cu totul independentă de *greutatea* pietrei atîrnate de ea. Această observaţie era în totală contradicţie cu dogma acceptată de toţi, cum că corpurile grele cad mai repede decît cele uşoare. De fapt, mişcarea unui pendul nu este altceva decît căderea liberă a unei greutăţi abătute de la direcţia verticală datorită restricţiei impuse de sfoară, care face ca greutatea să se deplaseze pe un arc de cerc cu centrul în punctul de suspensie (fig. 1).

Dacă obiectele uşoare şi cele grele atîrnate de sfori de aceeaşi lungime şi deviate cu acelaşi unghi faţă de verticală cad în timpuri egale, înseamnă că vor avea nevoie de timpuri egale pentru a cădea şi atunci cînd li se dă drumul simultan de la aceeaşi înălţime. Pentru a demonstra acest lucru adepţilor şcolii lui Aristotel, Galilei s-a urcat în turnul înclinat din Pisa sau în vreun alt turn (sau poate a însărcinat pe vreun discipol al său să se urce) şi a dat drumul la două greutăţi, una uşoară şi alta grea, care au atins Pămîntul în acelaşi moment, spre marea mirare a adversarilor săi (fig. 2).

Se pare că nu există nici un document oficial referitor la această demonstraţie, dar adevărul este că Galilei este acela care a descoperit că viteza corpurilor în cădere liberă nu depinde de masa lor. Acest principiu a fost ulterior dovedit prin numeroase experienţe mult mai exacte şi a fost folosit, după 272 de ani de la moartea lui Galilei, de către Albert Einstein, care l-a pus la baza teoriei sale relativiste a gravitaţiei, teorie despre care se va vorbi mai tîrziu în această carte.



1. Un candelabru *(a)* și o piatră legată de o sfoară *(b)* oscilează cu aceeași perioadă, dacă distanțele pînă la punctul de suspensie sînt egale.

Experiența lui Galilei se poate repeta ușor fără a merge la Pisa. Luați o monedă și o bucățică de hîrtie și dați-le drumul simultan de aceeași înălțime. Moneda va cădea repede, pe cînd bucata de hîrtie va rămîne în aer un timp

2. Experienţa lui Galilei la Pisa.

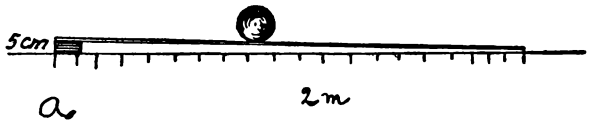
mult mai îndelungat. Dacă însă mototoliţi bucata de hîrtie şi faceţi din ea un mic cocoloş, ea va cădea aproape tot aşa de repede ca şi moneda. Dacă aţi avea un cilindru lung de sticlă din care s-a scos aerul, aţi vedea că o monedă, o foaie de hîrtie nemototolită şi un fulg cad în interiorul cilindrului cu aceeaşi viteză.

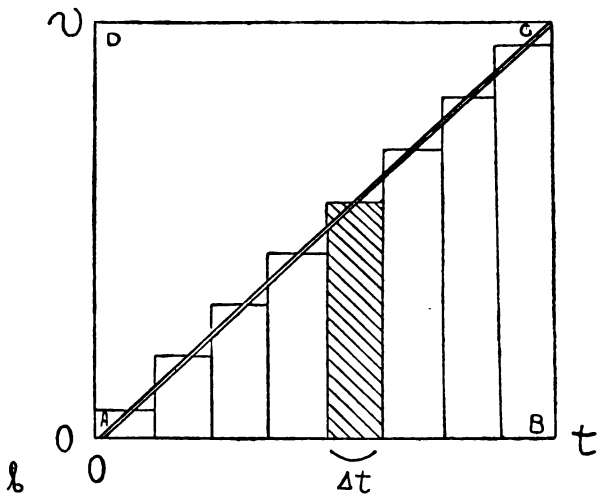
Următorul pas făcut de Galilei în studiul corpurilor care cad a fost să găsească o relație matematică între timpul cît durează căderea și distanța parcursă de obiect. Întrucît căderea liberă este, într-adevăr, prea rapidă pentru a putea fi observată cu ochiul și deoarece Galilei nu poseda instrumente moderne, cum este, de pildă, aparatul de cinematografie rapidă, el s-a gîndit să „dilueze" forța gravitației, lăsînd niște bile făcute din diferite materiale să se rostogolească pe un plan înclinat, în loc de a cădea pe verticală. Galilei a făcut următorul raționament corect: întrucît planul înclinat oferă un reazem parțial obiectelor grele puse pe el, mișcarea care rezultă ar trebui să fie asemănătoare cu căderea liberă, cu diferența că scala timpului s-ar lungi cu un factor depinzînd de înclinarea planului. Pentru măsurarea timpului, el a folosit un ceasornic cu apă, care este un dispozitiv cu un robinet ce poate fi deschis și închis. Intervalele de timp puteau fi măsurate prin cîntărirea cantității de apă ce se scurgea prin robinet în diferite perioade de timp. La intervale egale de timp Galilei însemna poziția succesivă a obiectelor care se rostogoleau pe planul înclinat.

Veți putea constata că nu e greu să repetați experiența lui Galilei și să verificați rezultatele pe care le-a obținut[1]. Luați o scîndură netedă de 2 m lungime și ridicați unul din capetele ei cu 5 cm deasupra podelei, punînd sub el vreo două cărți (fig. 3, *a*). Panta scîndurii va fi de $\frac{5}{200} = \frac{1}{40}$; acesta reprezintă factorul cu care se va reduce acțiunea forței de gravitație asupra obiectului. Luați apoi un cilindru de metal (care are mai puține șanse decît o bilă să

[1] Nefiind experimentator, autorul nu poate să spună, pe baza propriei sale experiențe, cît de ușor este să facă cineva experiența lui Galilei. El a auzit însă din diferite surse că, de fapt, nu este așa de ușor și recomandă cititorilor cărții de față să-și pună la încercare iscusința.

drumul, fără a-l împinge, de la capătul de sus al scîndurii. Ascultați țăcănitul unei pendule sau al unui metronom (de care se folosesc cei ce studiază muzica) și însemnați poziția cilindrului care se rostogolește la sfîrșitul primei,





3. *a* — un cilindru care se rostogolește pe un plan înclinat; *b* — metoda de integrare a lui Galilei.

celei de-a doua, a treia și a patra secunde. (Pentru a obține cît mai exact aceste poziții, experiența trebuie repetată de mai multe ori.) În aceste condiții, distanțele succesive de la capătul de sus al scîndurii vor fi de aproximativ 1,0, 4,0, 9,0, 16,0 și 25,0 cm. Se observă, fapt sesizat încă de Galilei, că distanțele la sfîrșitul celei de-a doua, a treia

și a patra secunde sînt respectiv de 4, 9, 16 și 25 de ori distanța la sfîrșitul primei secunde.

Această experiență dovedește că viteza corpurilor în căderea liberă variază în așa fel, încît *distanțele parcurse de un obiect în mișcare cresc cu pătratul timpului de deplasare* ($4 = 2^2$; $9 = 3^2$; $16 = 4^2$; $25 = 5^2$). Repetați experiența cu un cilindru de lemn sau cu unul și mai ușor, de lemn de balsa[1], și veți constata că vitezele de deplasare și distanțele parcurse la sfîrșitul intervalelor de timp consecutive rămîn aceleași ca în cazul cilindrului de metal.

Problema care s-a ridicat apoi a fost aceea de a găsi legea variației vitezei în funcție de timp, lege care să corespundă relației dintre distanță și timp semnalată mai sus. În cartea sa intitulată *Dialog asupra celor două științe noi*, Galilei scria că distanțele parcurse cresc cu pătratul timpului, dacă viteza este proporțională cu timpul la puterea întîi. În fig. 3, *b*, se dă o formă oarecum modernizată a legii stabilite de Galilei.

Să considerăm o diagramă în care viteza v este reprezentată în funcție de timpul t. Dacă v este proporțional cu t, obținem o linie dreaptă care pornește din punctul de coordonate $(0, 0)$ și ajunge pînă în punctul (t, v). Să împărțim intervalul de timp dintre 0 și t într-un număr mare de intervale de timp foarte mici și să ducem paralele la axa ordonatelor așa cum se vede în figură; se formează astfel un mare număr de dreptunghiuri înguste și înalte. Acum putem înlocui panta continuă corespunzătoare mișcării neîntrerupte a obiectului cu o linie în trepte ce reprezintă o mișcare în salturi (sacadată), în care viteza variază brusc prin creșteri mici și rămîne constantă un timp foarte scurt pînă ce se produce un nou salt. Dacă micșorăm intervalele de timp din ce în ce mai mult, numărul lor va

[1] Lemnul copacului *Ochroma lagopus* din America de Sud, cu densitatea 0,15. — *N.T.*

fi din ce în ce mai mare, iar diferența dintre panta continuă și linia frîntă devine din ce în ce mai puțin sensibilă și dispare complet cînd numărul de diviziuni ale intervalului (0, t) devine infinit de mare.

În cursul fiecărui interval scurt de timp se presupune că mișcarea are o viteză constantă corespunzătoare momentului respectiv, iar distanța parcursă este egală cu această viteză înmulțită cu intervalul de timp. Întrucît viteza este egală cu înălțimea dreptunghiului îngust, iar intervalul de timp este egal cu baza acestuia, produsul de care e vorba este egal cu *aria* dreptunghiului respectiv.

Repetînd același raționament pentru fiecare dreptunghi, ajungem la concluzia că distanța totală parcursă în intervalul de timp (0, t) este egală cu aria aflată sub linia frîntă, iar la limită, cu aria triunghiului ABC. Această arie reprezintă însă jumătate din dreptunghiul $ABCD$, care la rîndul său este egal cu produsul bazei sale t cu înălțimea v. Așadar, putem scrie pentru distanța sau spațiul parcurs în timpul t:

$$s = \frac{1}{2} vt,$$

în care v este viteza la momentul t. Conform ipotezei pe care am făcut-o, v este proporțional cu t, adică:

$$v = at,$$

unde a este o constantă cunoscută sub numele de *accelerație* sau cantitatea cu care variază viteza în unitatea de timp. Combinînd cele două formule, obținem:

$$s = \frac{1}{2} at^2,$$

care arată că distanța parcursă crește cu pătratul timpului.

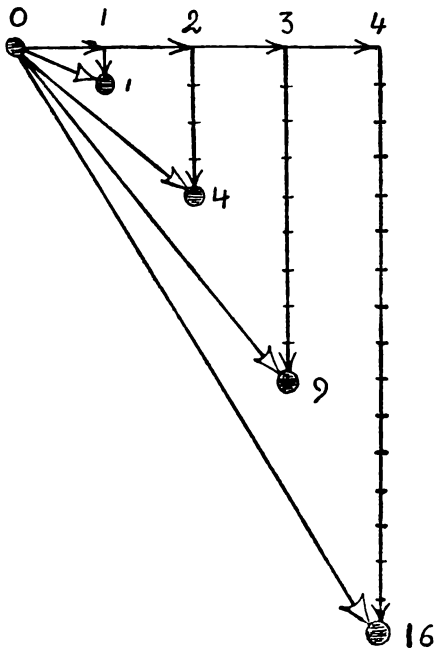
Procedeul acesta de a împărți o figură geometrică dată într-un mare număr de fîșii înguste și de a examina ce se întîmplă cînd numărul fîșiilor devine infinit de mare, iar lățimea lor infinit de mică a fost aplicat în secolul al III-lea î.e.n., de matematicianul grec Arhimede, la deducerea volumului conului și al altor corpuri geometrice. Galilei a fost însă primul care a aplicat această metodă la fenomenele mecanice, punînd astfel bazele disciplinei care, mai tîrziu, în mîinile lui Newton, a devenit una din ramurile cele mai importante ale științelor matematice.

Altă contribuție importantă a lui Galilei la fundamentarea tinerei științe a mecanicii a fost descoperirea principiului *suprapunerii mișcărilor*[1]. Dacă am arunca o piatră în direcția orizontală și dacă n-ar exista forța gravitațională, piatra s-ar mișca pe o linie dreaptă, ca o bilă pe o masă de biliard. Dacă, pe de altă parte, am lăsa piatra să cadă liber, ea ar cădea vertical cu viteză din ce în ce mai mare, cum am arătat mai sus. În realitate însă, cînd aruncăm o piatră, avem de-a face cu suprapunerea a două mișcări: piatra se mișcă orizontal cu viteză constantă și în același timp cade vertical uniform accelerat. Această situație este reprezentată grafic în fig. 4, în care săgețile orizontale și cele verticale numerotate reprezintă distanțele parcurse în cele două feluri de mișcări. Pozițiile rezultante ale pietrei pot fi indicate și printr-o singură săgeată (cu vîrful alb), care devine din ce în ce mai lungă și se rotește în jurul punctului origine.

Săgețile de felul celor de mai sus, care arată pozițiile consecutive ale unui corp în mișcare față de punctul origine, se numesc *vectori de poziție* și se caracterizează prin *lungime, direcție* și *sens*. Dacă corpul suferă mai multe deplasări succesive, fiecare dintre ele fiind definită prin-

[1] Se mai numește și „compunerea mișcărilor". — *N.T.*

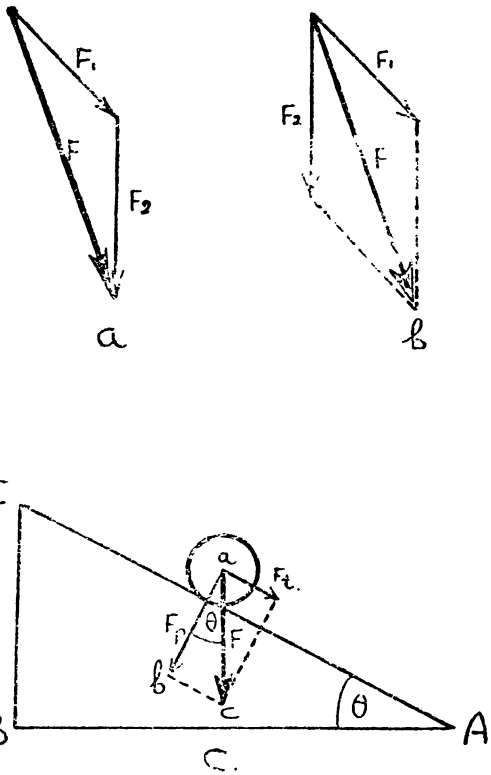
tr-un vector corespunzător, poziția finală poate fi definită printr-un singur vector, numit *suma* vectorilor inițiali. Pentru aflarea acestui vector final n-avem decît să desenăm succesiv fiecare săgeată începînd de la sfîrșitul celei precedente (fig. 5, *a*) și să unim cu o linie dreaptă începutul



4. Compunerea mișcării orizontale cu viteză constantă cu mișcarea verticală uniform accelerată.

primei săgeți cu sfîrșitul ultimei. Cu alte cuvinte, ca să luăm un exemplu banal, un avion care a zburat de la New York la Chicago, de la Chicago la Denver și de la Denver la Dallas, ar fi putut ajunge de la New York la Dallas zburînd în linie dreaptă între aceste două orașe. Alt mod de a aduna doi vectori este următorul: se desenează cele două săgeți începînd din același punct, se com-

pletează paralelogramul și se duce diagonala acestuia cum se arată în fig. 5, *b*. Comparînd cele două desene, ne putem convinge că ambele metode duc la același rezultat.



5. *a* și *b* — două moduri de a aduna vectori; *c* — forțele care acționează asupra unui cilindru pus pe un plan înclinat.

Noțiunea de vectori de poziție și operația de adunare a acestora se pot extinde și la alte cantități mecanice care au o direcție orientată în spațiu. Închipuiți-vă un vas port-avion făcînd atîtea noduri pe oră[1] în direcția nord-nord-

[1] 1 nod sau milă marină engleză = 1 855 m. — *N.T.*

vest și un marinar care aleargă pe puntea lui de la tribord la babord cu viteză de atîția metri pe minut. Cele două mișcări pot fi reprezentate prin săgeți îndreptate cu vîrful în direcția și sensul mișcării respective și avînd lungimi proporționale cu vitezele corespunzătoare (care trebuie, evident, să fie exprimate în aceleași unități). Care este viteza marinarului în raport cu apa? Tot ce avem de făcut este să adunăm cei doi vectori viteză după regulile cunoscute, adică construind diagonala paralelogramului definit de cei doi vectori inițiali.

Și forțele pot fi reprezentate prin vectori care indică direcția forței ce acționează și intensitatea efortului depus și pot fi adunate după aceeași regulă. Să considerăm, de exemplu, vectorul forței gravitației acționînd asupra unui corp așezat pe un plan înclinat (fig. 5). Acest vector are direcția verticală de sus în jos, dar inversînd metoda de adunare a vectorilor, putem, desigur, să-l reprezentăm sub forma sumei a doi (sau mai mulți) vectori orientați după direcții date. În exemplul nostru, alegem o componentă orientată paralel cu direcția planului înclinat și alta perpendiculară pe acesta, ca în figură. Observăm că triunghiurile dreptunghice ABC (forma geometrică a planului înclinat) și abc (format din vectorii F, F_p și F_t) sînt asemenea, avînd unghiurile A și a egale. Din geometria euclidiană rezultă că:

$$\frac{F_t}{F} = \frac{BC}{AC}.$$

Această ecuație justifică afirmația pe care am făcut-o în legătură cu experiența cu planul înclinat a lui Galilei.

Folosind datele obținute prin experiențe cu plane înclinate, se poate găsi că accelerația căderii libere este de 9,81 m/s^2. Această valoare variază puțin cu latitudinea pe suprafața Pămîntului și cu altitudinea deasupra nivelului mării.

MĂRUL ŞI LUNA

Povestea că Isaac Newton a descoperit legea gravitaţiei universale pe cînd privea un măr cum cade dintr-un pom (fig. 6) poate să fie sau nu tot aşa de legendară ca poveştile cu Galilei, care privea candelabrul în catedrala din Pisa sau lăsa să cadă greutăţi din turnul înclinat, dar ea amplifică rolul mărului în legendă şi în istorie. Pe drept cuvînt, mărul lui Newton poate sta alături de mărul Evei, care a avut ca efect izgonirea primilor oameni din rai, de mărul lui Paris, de la care s-a pornit războiul troian, şi de mărul lui Wilhelm Tell, care şi-a adus contribuţia la întemeierea uneia din ţările cele mai iubitoare de pace din lume. Fără îndoială, că atunci cînd tînărul Isaac, în vîrstă de 23 de ani, medita asupra naturii gravitaţiei, avea destule ocazii să observe merele căzînd; pe vremea aceea, el locuia la o fermă din Lincolnshire, pentru a scăpa de „ciuma cea mare", care cuprinsese Londra în 1665 şi făcuse să se închidă temporar Universitatea din Cambridge. Într-una din scrierile sale, Newton face următoarea observaţie: „În acest an am început să mă gîndesc la gravitaţie, care se întinde pînă la orbita Lunii, şi am comparat forţa necesară pentru a ţine Luna pe orbita ei cu forţele de gravitaţie de la suprafaţa Pămîntului".

Raţionamentul lui Newton cu privire la acest subiect, publicat mai tîrziu în cartea sa intitulată *Principiile mate-*

6. Isaac Newton la ferma din Lincolnshire.

matice ale filozofiei naturale[1], este cam acesta: Dacă, găsindu-ne pe vîrful unui munte, tragem un glonț în direcție orizontală, mișcarea sa va consta din două componente: a) o mișcare orizontală, cu viteza inițială pe care o avea la ieșirea din pușcă; b) o cădere liberă accelerată sub influența forței gravitației. Ca rezultat al suprapunerii celor două mișcări, glonțul va descrie o traiectorie parabolică și va atinge Pămîntul la o distanță oarecare. Dacă Pămîntul ar fi plan, glonțul ar cădea întotdeauna pe Pămînt, chiar dacă punctul de cădere s-ar găsi la distanță foarte mare de locul unde se află pușca. Dar întrucît Pămîntul este rotund, suprafața sa se curbează mereu sub traiectoria glonțului și, la o anumită viteză-limită, traiectoria acestuia ar urma curbura globului. Așadar, în acest caz, dacă n-ar exista rezistența aerului, glonțul n-ar cădea niciodată pe Pămînt, ci s-ar învîrti neîncetat în jurul lui la o înălțime constantă.

Aceasta a fost prima teorie a satelitului artificial, iar Newton a ilustrat-o cu un desen foarte asemănător cu acelea pe care le vedem astăzi în articolele de popularizare a problemelor despre rachete și sateliți. Desigur, sateliții nu se lansează de pe vîrfurile munților, dar sînt mai întîi ridicați aproape vertical dincolo de limita atmosferei terestre și apoi li se imprimă viteza orizontală necesară pentru a descrie o mișcare circulară în jurul Pămîntului. Considerînd mișcarea Lunii drept o cădere neîntreruptă care niciodată nu atinge Pămîntul, Newton a putut calcula forța gravitației care acționează asupra masei Lunii. În formă oarecum modernizată, acest calcul se face în modul următor:

Să considerăm Luna mișcîndu-se pe o orbită circulară în jurul Pămîntului (fig. 7). La un moment dat ea se găsește

---

[1] Vezi I. Newton, *Principiile matematice ale filozofiei naturale*, Editura Academiei R.P.R., București, 1956.

în M, iar viteza pe direcția perpendiculară pe raza orbitei este v. Dacă Luna n-ar fi atrasă de Pămînt, ea s-ar mișca pe o linie dreaptă și, după un interval scurt de timp Δt, s-ar găsi în poziția M', astfel, încît $\overline{MM'} = v\Delta t$. Dar mai există o componentă a mișcării Lunii, și anume, căderea liberă spre Pămînt. Așadar, traiectoria sa se curbează și, în loc de a ajunge în punctul M', Luna ajunge în punctul M'' de pe orbita sa circulară, iar segmentul $\overline{M'M''}$ reprezintă distanța cu care Luna a căzut spre Pămînt în intervalul de timp Δt. Acum să considerăm triunghiul dreptunghic PMM' și să-i aplicăm teorema lui Pitagora, care spune că într-un triunghi dreptunghic pătratul ipotenuzei este egal cu suma pătratelor celorlalte două catete. Așadar, avem:

$$(\overline{PM}'' + \overline{M''M'})^2 = \overline{PM}^2 + \overline{MM'}^2$$

sau, deschizînd paranteza:

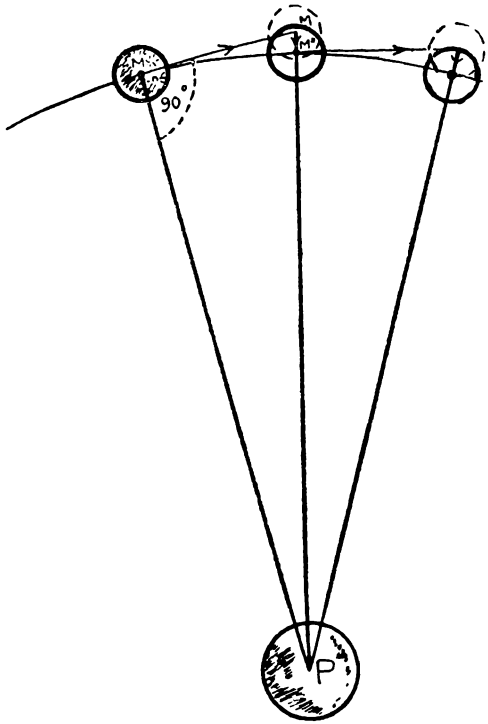
$$\overline{PM}''^2 + 2\overline{PM}'' \cdot \overline{M''M'} + \overline{M''M'}^2 = \overline{PM}^2 + \overline{MM'}^2.$$

Avînd în vedere că $\overline{PM}'' = \overline{PM}$, anulînd acești termeni în ambii membri ai ecuației și, împărțind cu $2\overline{PM}$, căpătăm:

$$\overline{M''M'} + \frac{\overline{M''M'}^2}{2\,\overline{PM}} = \frac{\overline{MM'}^2}{2\overline{PM}}.$$

Urmează un raționament important. Dacă considerăm intervale de timp din ce în ce mai mici, $\overline{M''M'}$ devine, de asemenea, din ce în ce mai mic și ambii termeni din primul membru al egalității se apropie de zero. Dar, întrucît al doilea termen conține *pătratul* lui $\overline{M''M'}$, el tinde către zero mai repede decît primul; în adevăr, dacă $\overline{M''M'}$ ia valorile:

$$\frac{1}{10}\,;\ \frac{1}{100}\,;\ \frac{1}{1000}\ \text{etc.},$$



7. Calculul acceleraţiei Lunii.

pătratul său devine:

$$\frac{1}{100}\ ;\ \frac{1}{10\,000}\ ;\ \frac{1}{1\,000\,000}\ \text{etc.}$$

Aşadar, cînd e vorba de intervale de timp suficient de mici, putem neglija al doilea termen din membrul întîi în comparaţie cu primul şi putem scrie:

$$\overline{M''M'} = \frac{\overline{MM'^2}}{2\overline{PM}},$$

ceea ce va fi absolut corect, evident, numai cînd $\overline{M''M'}$ este infinit de mic.

Deoarece $\overline{MM'} = v\Delta t$ *şi* $\overline{PM} = R$, putem scrie relaţia de mai sus sub forma

$$\overline{M''M'} = \frac{1}{2}\left(\frac{v^2}{R}\right)\Delta t^2.$$

Cînd am vorbit despre cercetările lui Galilei asupra legii căderii corpurilor, am văzut că distanţa parcursă în intervalul de timp Δt este $\frac{1}{2}a\Delta t^2$, în care a este acceleraţia, de unde, comparînd cele două expresii, tragem concluzia că $\frac{v^2}{R}$ reprezintă acceleraţia cu care Luna cade neîncetat spre Pămînt, fără a-l atinge vreodată.

Aşadar, putem scrie acceleraţia astfel:

$$a = \frac{v^2}{R} = \left(\frac{v}{R}\right)^2 R = \omega^2 R,$$

în care

$$\omega = \frac{v}{R}$$

este *viteza unghiulară* a Lunii pe orbita sa. Legătura dintre viteza unghiulară ω (litera grecească *omega*) a oricărei mişcări de rotaţie şi perioada de rotaţie T este foarte simplă. Într-adevăr, putem transcrie această formulă astfel:

$$\omega = \frac{2\pi v}{2\pi R} = 2\pi\frac{v}{s},$$

în care $s = 2\pi R$ este lungimea totală a orbitei circulare. Evident că perioada de rotaţie T este egală cu $\frac{s}{v}$, aşa că formula devine:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Luna efectuează o revoluție completă în jurul Pământului în 27,3 zile sau $2{,}35 \cdot 10^6$ s. Punînd această valoare în locul lui T din expresia de mai sus, obținem:

$$\omega = 2{,}67 \cdot 10^{-6}/s.$$

Folosind această valoare a lui ω și luînd $R = 384\,400$ km $= 3{,}844 \cdot 10^{10}$ cm, Newton a găsit pentru accelerația Lunii valoarea 0,27 cm/s^2, care este de 3 640 de ori mai mică decît accelerația de 981 cm/s^2 de la suprafața Pământului. În modul acesta s-a demonstrat clar că gravitația descrește pe măsură ce distanța de la Pământ crește. Care este însă legea după care are loc această descreștere? Mărul care cade se găsește la o distanță de 6 371 km de centrul Pământului, iar Luna la o distanță de 384 400 km, adică de 60,1 de ori mai mare. Comparînd cele două rapoarte 3 640 și 60,1, Newton a observat că primul este aproape exact egal cu pătratul celui de-al doilea. Rezultă prin urmare că legea gravitației este foarte simplă: *forța de atracție descrește cu inversul pătratului distanței.*

Dar dacă Pământul atrage mărul și Luna, de ce să nu presupunem că Soarele atrage Pământul și celelalte planete, menținîndu-le pe orbitele lor? Ar trebui, de asemenea, să existe atracție și între diferitele planete, fapt care ar perturba mișcările lor în jurul corpului care formează centrul sistemului. Dacă lucrurile stau astfel, două mere ar trebui să se atragă între ele, deși forța lor de atracție reciprocă poate fi prea slabă pentru a fi percepută de simțurile noastre. E clar că forța de atracție a gravitației universale depinde de masele corpurilor care interacționează. Conform uneia din legile fundamentale ale mecanicii, formulată de Newton, *o forță dată acționînd asupra unui anumit corp material îi imprimă acestuia o accelerație care este proporțională cu forța și invers proporțională cu masa corpului;* în adevăr, e necesar un efort de

două ori mai mare pentru a imprima o aceeași viteză unui corp cu masa dublă.

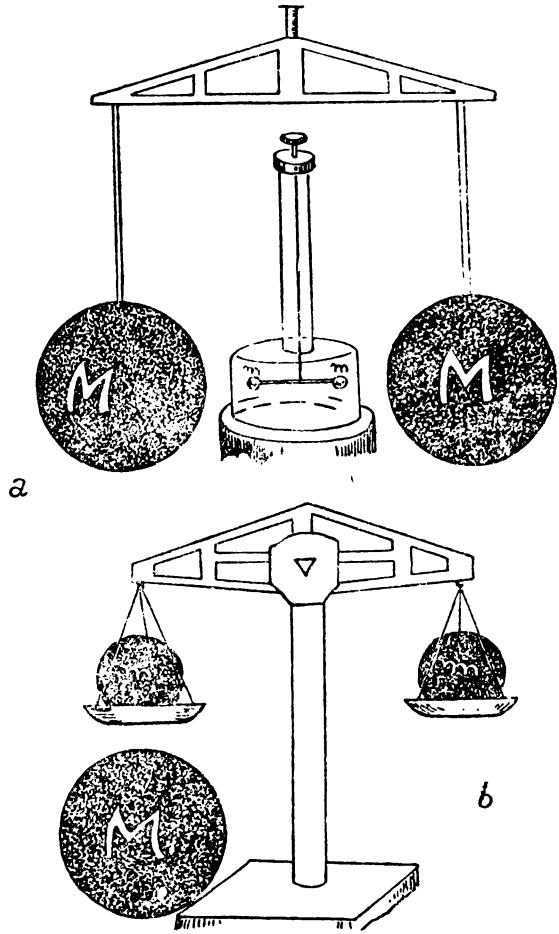
Așadar, din descoperirea lui Galilei că toate corpurile, indiferent de greutatea lor, cad cu aceeași accelerație în cîmpul de gravitație, trebuie să se tragă concluzia că forțele care le trag în jos sînt proporționale cu masa lor, adică cu rezistența pe care o opun accelerației. Dar dacă așa stau lucrurile, e natural ca forța gravitației să fie proporțională și cu masa celuilalt corp. Atracția datorită gravitației dintre Pămînt și Lună este foarte mare din cauză că ambele corpuri au mase foarte mari. Atracția dintre Pămînt și un măr este mult mai slabă, deoarece mărul este așa de mic, iar atracția dintre două mere trebuie să fie cu totul neglijabilă.

Folosind raționamente de acest fel, Newton a reușit să formuleze *legea gravitației universale*, conform căreia *două corpuri materiale oarecare se atrag între ele cu o forță proporțională cu produsul maselor lor și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele*. Dacă notăm cu M_1 și M_2 masele celor două corpuri care interacționează și cu R distanța dintre ele, forța de interacțiune datorită gravitației se va exprima printr-o formulă simplă:

$$F = \frac{GM_1M_2}{R^2},$$

în care G (reprezentînd gravitația) este o constantă universală.

Newton n-a apucat să vadă o dovadă experimentală directă a legii atracției dintre două corpuri, de masă aproximativ egală cu aceea a unui măr. La trei sferturi de secol după moartea sa, ingeniosul savant englez Henry Cavendish a demonstrat experimental justețea legii descoperite de Newton. Pentru a dovedi existența atracției gravitaționale, Cavendish s-a folosit de niște aparate foarte delicate, care pe vremea aceea reprezentau culmea iscu-



8. *a* — principiul balanței lui Cavendish; *b* — balanța modificată de Boys.

sinței în materie de experimente, dar care astăzi pot fi întîlnite în majoritatea laboratoarelor de fizică, unde se fac lecții practice pentru fixarea cunoștințelor studenților asupra legii gravitației universale.

Principiul balanței lui Cavendish este arătat în fig. 8. O bară ușoară cu două sfere mici fixate la capetele ei este suspendată de un fir lung, subțire ca firul pînzei de păianjen, și este așezată într-un vas de sticlă închis, pentru a o feri de influența curenților de aer. La exteriorul acestui vas de sticlă sînt suspendate două sfere cu masă foarte mare, care pot fi rotite în jurul unei axe verticale trecînd prin centrul sistemului. După ce sistemul ajunge în stare de echilibru, se schimbă poziția sferelor mari și se observă că bara cu sferele mici se rotește cu un unghi oarecare, în urma atracției gravitaționale exercitate de sferele mari. Măsurînd unghiul de deviație și cunoscînd rezistența la torsiune a firului, Cavendish a putut evalua forța cu care sferele cu masă mare acționau asupra sferelor mici. Repetînd această experiență, el a găsit că valoarea numerică a coeficientului G din formula lui Newton este $6{,}66 \cdot 10^{-8}$, dacă lungimile, masele și timpul se măsoară respectiv în centimetri, grame și secunde. Folosind această valoare, se poate calcula că forța de gravitație dintre două mere așezate aproape unul de altul este echivalentă cu circa 1/350 000 000 g.

Fizicianul englez C.V. Boys[1] (1855—1944) a repetat experiența lui Cavendish într-o formă modificată. După ce a echilibrat două greutăți egale pe talerele unei balanțe (fig. 8), el a pus o sferă cu masă mare sub unul din talere și a observat că balanța se înclină puțin; la atracția globului pămîntesc asupra greutății mici s-a mai adăugat și atracția sferei mari. Înclinarea observată a permis lui Boys să calculeze raportul dintre masa sferei și masa Pămîntului. El a găsit astfel că Pămîntul cîntărește $6 \cdot 10^{24}$ kg.

---

[1] Autorul cărții *Baloanele de săpun și forțele care le modelează*, în colecția „Science Study Series".

CALCULUL INFINITEZIMAL

Poate părea greu de înțeles faptul că Newton, după ce a descoperit principiile fundamentale ale gravitației universale chiar la începutul carierei sale științifice, a amînat publicarea lor timp de vreo douăzeci de ani, pînă ce a putut prezenta o formulare matematică completă a teoriei gravitației universale în remarcabila sa lucrare *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica,* apărută în 1687.

Motivul acestei lungi întîrzieri a fost că Newton, deși avea idei clare în ce privește legile fizice ale gravitației, nu dispunea de metodele necesare pentru a dezvolta toate consecințele legii fundamentale a interacțiunii dintre corpurile materiale pe care o descoperise. Cunoștințele matematice ale timpului său erau insuficiente pentru rezolvarea problemelor care se iveau în legătură cu interacțiunea gravitațională a corpurilor materiale. De exemplu, ocupîndu-se de problema atracției dintre Pămînt și Lună pe care am analizat-o în capitolul precedent, Newton a trebuit să facă ipoteza că forța gravitației este invers proporțională cu pătratul distanței dintre *centrele* acestor două corpuri. Dar cînd un măr este atras de globul pămîntesc, forța care-l trage în jos se compune dintr-un număr infinit de forțe diferite cauzate de atracția exercitată de rocile situate la diferite adîncimi sub rădăcinile mărului, de stîncile Munților Himalaya și ale Munților Stîncoși, de apele Oceanului Pacific și de miezul de fier topit din centrul Pămîntului. Pentru ca raportul dintre

forțele cu care Pămîntul acționează asupra mărului și asupra Lunii, raport dedus așa cum s-a văzut mai sus, să fie ireproșabil din punct de vedere matematic, Newton trebuia să dovedească că toate aceste forțe au ca rezultantă o singură forță, care ar acționa dacă toată masa Pămîntului ar fi concentrată în centrul acestuia.

Această problemă, asemănătoare, dar mult mai complicată decît problema lui Galilei privitoare la mișcarea unei particule cu viteză accelerată, depășea posibilitățile matematice de pe vremea lui Newton, astfel că el a trebuit să-și creeze o matematică proprie. În modul acesta, el a pus bazele a ceea ce se numește *calculul infinitezimal.* Această ramură a matematicii, care astăzi este absolut obligatorie pentru studiul tuturor științelor și devine din ce în ce mai importantă în biologie și în alte domenii, diferă de disciplinele matematice clasice prin faptul că face uz de o metodă în care liniile, suprafețele și volumele geometriei clasice se împart într-un mare număr de părți foarte mici și se consideră relațiile lor reciproce în cazul-limită cînd fiecare subdiviziune tinde la zero. Am întîlnit pînă acum astfel de raționamente în modul în care Newton a dedus accelerația Lunii (pag. 29), cînd am văzut că termenul al doilea al membrului întîi al ecuației poate fi neglijat în comparație cu primul termen, dacă se consideră că Luna și-a modificat poziția într-un interval de timp infinit de scurt.

Să considerăm un tip general de mișcare, în care coordonata x a unui corp în mișcare este dată în funcție de timpul t. În limbaj curent, aceasta înseamnă că valoarea lui x variază într-un mod determinat cînd valoarea lui t se modifică. În cazul cel mai simplu, x poate fi proporțional cu t și atunci putem scrie:

$$x = At,$$

în care A este o constantă datorită căreia ambii membri ai ecuației devin egali.

Acest caz este banal. Să considerăm două momente t și $t+\Delta t$ în care Δt este o creștere mică, care mai tîrziu va trebui să fie făcută egală cu zero. Distanța parcursă în acest interval de timp este, evident:

$$A(t+\Delta t) - At = A\Delta t;$$

împărțind această expresie la Δt, obținem exact A. În acest caz, nici nu avem nevoie să facem pe Δt infinit de mic, deoarece el se simplifică în ecuație. Așadar, obținem pentru rapiditatea de variație a lui x în raport cu timpul, sau „fluxiunea lui x", cum o numea Newton:

$$\dot{x} = A,$$

în care punctul de deasupra variabilei înseamnă rapiditatea de variație a acestei variabile.

Să luăm acum un caz ceva mai complicat, exprimat prin relația

$$x = At^2.$$

Luînd iarăși valorile lui x pentru t și $t+\Delta t$, avem:

$$A(t+\Delta t)^2 - At^2$$

și, deschizînd paranteza, obținem:

$$At^2 + 2At\Delta t + A\Delta t^2 - At^2 = 2At\Delta t + A\Delta t^2.$$

Împărțind acest rezultat cu Δt, obținem o expresie formată din doi termeni:

$$2At + A\Delta t.$$

Dacă Δt devine infinit de mic, al doilea termen dispare și avem pentru „fluxiunea" lui $x = At^2$:

$$\dot{x} = 2At.$$

Considerînd cazul

$$x = At^3,$$

trebuie să calculăm expresia:

$$A(t + \Delta t)^3 - At^3.$$

Ridicînd $(t+\Delta t)$ la cub și scăzînd Δt^3, avem:

$$A(t^3 + 3t^2\Delta t + 3t\Delta t^2 + \Delta t^3) - At^3 = 3At^2\Delta t + 3At\Delta t^2 + A\Delta t^3$$

și împărțind cu Δt:

$$3At^2 + 3At\Delta t + A\Delta t^2.$$

Dacă Δt devine infinit de mic, ultimii doi termeni dispar și obținem pentru fluxiunea lui $x = At^3$:

$$\dot{x} = 3At^2.$$

Putem continua cu $x = At^4$, $x = At^5$ etc., obținînd „fluxiunile" $4At^3$, $5At^4$ etc. E ușor de dedus regula generală:

„fluxiunea" lui $x = At^n$, în care n este un număr întreg, este egală cu nAt^{n-1}.

În exemplele de mai sus am calculat „fluxiunile" cantităților care variază direct proporțional cu timpul, cu pătratul timpului, cu cubul timpului etc. Dar ce facem cu cantitățile care variază *invers* proporțional cu diferitele puteri ale timpului? Știm din algebră că:

$$t^{-1} = \frac{1}{t}\ ;\ t^{-2} = \frac{1}{t^2}\ ;\ t^{-3} = \frac{1}{t^3}\ ;\ \text{etc.}$$

Folosind acești exponenți negativi și procedînd ca mai înainte, găsim că „fluxiunile" lui

$$x = At^{-1};\quad x = At^{-2};\quad x = At^{-3};\quad \text{etc.}$$

sînt respectiv

$$\dot{x} = -At^{-2};\quad \dot{x} = -2At^{-3};\quad \dot{x} = -3At^{-4};\ \text{etc.}$$

Aici s-a pus semnul minus înaintea „fluxiunii", deoarece în cazul proporționalității inverse, cantitățile variabile *descresc* cînd timpul crește, și rapiditatea lor de variație este *negativă*. Prin urmare, regula generală după care se cal-

culează „fluxiunile" rămîne aceeaşi ca şi în cazul proporţionalităţii directe: pentru a obţine „fluxiunea", *înmulţim funcţia putere iniţială cu exponentul şi reducem valoarea exponentului cu o unitate.*

Rezultatele analizei precedente sînt grupate în tabelul ce urmează:

$x =$	At^{-3};	At^{-2};	At^{-1};	At;	At^2;	At^3;	At^4; etc.
$\dot{x} =$	$-3At^{-4}$;	$-2At^{-3}$;	$-At^{-2}$;	A;	$2At$;	$3At^2$;	$4At^3$; etc.

În timp ce $\dot{x}$ în notaţiile lui Newton reprezintă viteza de *variaţie* a lui x, $\ddot{x}$ reprezintă rapiditatea de *variaţie a acestei viteze de variaţie.* Astfel, de pildă, dacă $x = At^3$,

$$\dot{x} = 3At^2 \text{ şi } \ddot{x} = \dot{\boxed{3At^2}} = 3A \cdot 2t = 6At.$$

în mod similar $\dddot{x}$, care este viteza de *variaţie a rapidităţii de variaţie a vitezei,* va fi în acest caz:

$$\dddot{x} = \dot{\boxed{6At}} = 6A.$$

Să aplicăm acum aceste reguli simple formulei obţinute de Galilei pentru căderea liberă a corpurilor materiale. În capitolul I am găsit că distanţa s, parcursă la momentul t, este dată de

$$s = \frac{1}{2} at^2.$$

Întrucît viteza v reprezintă rapiditatea de variaţie a poziţiei corpului, avem

$$v = \dot{s} = \frac{1}{2} a \cdot 2t = at,$$

ceea ce arată că viteza este proporțională cu timpul la puterea întîi. Pentru accelerația a, care reprezintă rapiditatea de variație a vitezei (sau viteza de variație a rapidității de variație a poziției), avem:

$$a = \ddot{s} = \dot{v} = a,$$

care este, desigur, un rezultat banal.

Înainte de a părăsi acest subiect, trebuie să observăm că notațiile „fluxiunii" adoptate de Newton sînt foarte rar utilizate în prezent. În timpul în care Newton elabora metoda „fluxiunilor" cunoscută în prezent sub numele de calculul diferențial, matematicianul german, Gottfried W. Leibniz, lucra și el la aceeași problemă, folosind însă o terminologie și un sistem de notații diferit. Ceea ce la Newton era prima, a doua etc. fluxiune, la Leibniz era prima, a doua etc. *derivată* și, în loc de a scrie $\dot{x}$, $\ddot{x}$, $\dddot{x}$, etc., Leibniz scria:

$$\frac{dx}{dt}\ ;\ \frac{d^2x}{dt^2}\ ;\ \frac{d^3x}{dt^3}\ ;\quad \text{etc.}$$

Conținutul matematic al celor două sisteme este, evident, același.

În timp ce calculul diferențial consideră relațiile dintre părțile figurilor geometrice cînd aceste părți devin infinit de mici, *calculul integral* are o sarcină exact opusă: integrarea unor părți infinit de mici în figuri geometrice avînd dimensiunea finită. Am întîlnit această metodă în capitolul I, cînd am descris metoda lui Galilei de a aduna un număr foarte mare de dreptunghiuri foarte înguste, a căror arie reprezenta mișcarea unei particule într-un interval de timp foarte scurt. Metode similare au fost folosite înaintea lui Galilei de matematicienii greci pentru a afla volumul conurilor și al altor figuri geometrice simple, dar metoda generală de rezolvare a problemelor de acest fel nu era cunoscută.

Pentru a înțelege legătura dintre calculul diferențial și cel integral, să considerăm mișcarea unui punct a cărui viteză este dată de funcția v (t) reprezentată în fig. 9. Făcînd uz de aceleași raționamente ca în cazul simplu din fig. 3, tragem concluzia că distanța s, parcursă în intervalul de timp t, este dată de *aria* suprafeței de sub curba vitezei. Rapiditatea de variație a lui s într-un anumit moment este dată de viteza în acel moment, așa că putem scrie:

$$\dot{s} = v \quad \text{sau} \quad \frac{ds}{dt} = v$$

în notația lui Newton, respectiv a lui Leibniz. Așadar, dacă v se dă în funcție de timp, s trebuie să fie o funcție de timp de așa natură, încît fluxiunea (sau derivata) sa să fie egală cu v.

În cazul mișcării uniform accelerate:

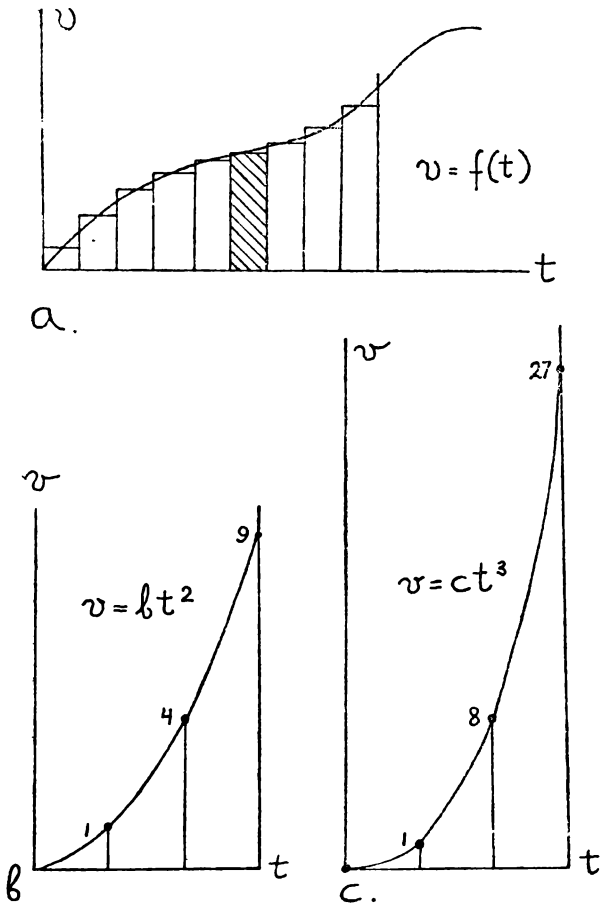
$$v = at,$$

așa încît trebuie să găsim o funcție de timp a cărei fluxiune să fie egală cu at. Consultînd tabelul de la pag. 40, găsim că fluxiunea lui At^2 este $2At$, așa că derivata lui $\frac{1}{2} At^2$ este egală cu At. Deci, scriind a în loc de A, găsim că $s = \frac{1}{2} at^2$. Acest rezultat coincide cu cel obținut de Galilei pe baza unor considerații pur geometrice.

Să considerăm însă două cazuri mai complicate: unul în care viteza crește cu pătratul timpului și altul în care ea crește cu cubul timpului. Pentru aceste două cazuri trebuie să scriem:

$$v = bt^2 \quad \text{și} \quad v = ct^3.$$

Aceste două cazuri sînt reprezentate de diagramele din fig. 9, unde, exact ca în cazul simplu de mai înainte, distanțele parcurse sînt reprezentate prin ariile suprafețelor



9. *a* — integrarea unei funcții arbitrare; *b* — integrarea unei funcții pătratice; *c* — integrarea unei funcții cubice.

de sub curbele respective. Deoarece avem aici de-a face cu linii curbe și nu cu drepte, nu dispunem de o regulă geometrică simplă care să ne permită să aflăm aceste arii.

Aplicînd metoda lui Newton, ne uităm iarăși la tabelul de la pag. 40 și găsim că derivatele lui At^3 și At^4 sînt $3At^2$

și $4At^3$, diferind de expresiile date ale vitezelor numai prin coeficienții numerici ai lor. Astfel, punînd $3A = b$ și $4A = c$, găsim pentru ariile suprafețelor de sub cele două curbe:

$$s_b = \frac{1}{3}\, bt^3 \quad \text{și} \quad s_c = \frac{1}{4}\, ct^4.$$

Această metodă este absolut generală și poate fi aplicată pentru orice putere a lui t, precum și pentru expresii mai complicate, cum ar fi:

$$v = at + bt^2 + ct^3,$$

pentru care căpătăm:

$$s = \frac{1}{2}\, at^2 + \frac{1}{3}\, bt^3 + \frac{1}{4}\, ct^4.$$

Din analiza de mai sus vedem că calculul integral este *inversul* calculului diferențial: *problema este deci de a găsi funcția necunoscută a cărei derivată este egală cu o funcție dată.* Așadar, putem transcrie acum tabelul de la pag. 40, schimbînd ordinea celor două rînduri ale sale și modificînd coeficienții numerici sub forma următoare:

$\dot{x} =$	At^{-4}; At^{-3}; At^{-2}; A; At; At^2; At^3; etc.
$x =$	$-\frac{A}{3}t^{-3}$; $-\frac{A}{2}t^{-2}$; $-At^{-1}$; At; $\frac{A}{2}t^2$; $\frac{A}{3}t^3$; $\frac{A}{4}t^4$; etc.

Spunem că x este integrala lui $\dot{x}$. În notațiile lui Newton, acest lucru se scrie astfel:

$$x = (\dot{x})';$$

unde accentul prim pus în afara parantezei anulează *punctul* de deasupra lui x. În notațiile lui Leibniz scriem:

$$x = \int \dot{x}\, dt,$$

în care simbolul din fața membrului al doilea este litera S alungită, care înlocuiește cuvîntul *sumă*.

Să aplicăm acest nou tabel la același exemplu de mai înainte al unei mișcări uniform accelerate. Întrucît accelerația este constantă, scriem:

$$\ddot{x} = a \qquad \text{sau} \qquad \boxed{\dot{x}} = a,$$

din care rezultă că:

$$\dot{x} = \int a\,\mathrm{d}t = at.$$

Integrînd a doua oară și consultînd noul nostru tabel, obținem:

$$x = \int at \cdot \mathrm{d}t = \frac{a}{2} t^2 ,$$

adică același rezultat ca cel obținut mai înainte.

Dacă accelerația nu este constantă, ci este, să zicem, proporțională cu timpul, avem:

$$\ddot{x} = bt$$

$$\dot{x} = \int bt\mathrm{d}t = \frac{1}{2} bt^2 ,$$

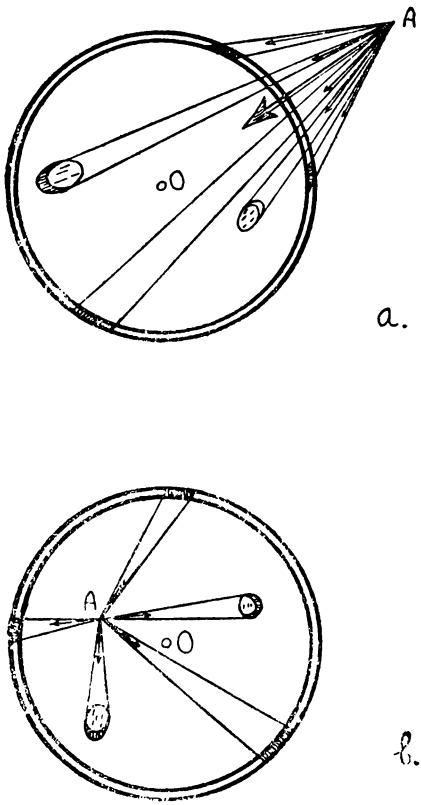
$$x = \int \frac{1}{2} bt^2\,\mathrm{d}t = \frac{b}{2}\int t^2\mathrm{d}t = \frac{b}{6} t^3.$$

Așadar, în acest caz, distanța parcursă de un obiect în mișcare crește cu cubul timpului.

Formularea elementară a calculului diferențial și integral poate fi extinsă la trei dimensiuni, cînd avem toate trei coordonatele x, y și z, dar lăsăm această sarcină cititorului, care a găsit că discuția de mai sus este prea ușoară.

După ce a elaborat principiile fundamentale ale calculului infinitezimal, Newton le-a aplicat la rezolvarea pro-

blemelor care stăteau în calea teoriei gravitației universale pe care o formulase — în primul rînd, la problema forței de gravitație exercitate de globul terestru asupra



10. *a* — forța de gravitație exercitată de un strat sferic asupra unui punct exterior; *b* — același lucru, cu deosebirea că punctul este în interior.

oricărui obiect material mic situat la orice distanță de centrul său. În acest scop, el a împărțit Pămîntul în strate concentrice subțiri și a considerat separat acțiunea forței gravitaționale a fiecărui strat (fig. 10). Pentru a folosi cal-

culul integral, trebuie să împărțim suprafețele acestor strate într-un număr mare de regiuni cu arii egale și apoi să calculăm forța de gravitație exercitată de fiecare strat asupra punctului *A* în conformitate cu legea proporționalității cu inversul pătratului distanței. Această analiză conduce la un număr foarte mare de vectori de forță aplicați punctului *A*, iar acești vectori trebuie să fie integrați după regulile adunării vectorilor.

Soluția efectivă a acestei probleme depășește principiile elementare pe care le-am discutat mai sus, dar Newton a reușit s-o rezolve. Rezultatul a fost că atunci cînd punctul *A* se găsește *în exteriorul* stratului sferic, toți vectorii se adună și dau un singur vector *egal cu forța de gravitație care ar exista dacă întreaga masă a stratului sferic ar fi concentrată în centrul ei*. În cazul în care punctul *A* este *în interiorul* stratului, suma tuturor vectorilor este egală cu zero, așa încît asupra obiectului nu acționează nici o forță de gravitație. Acest rezultat a rezolvat îndoielile lui Newton în ce privește forța exercitată de Pămînt asupra mărului și a justificat legea gravitației universale pe care o formulase cînd nu era decît un tînăr ce medita asupra enigmelor naturii în grădina unei ferme din Lincolnshire.

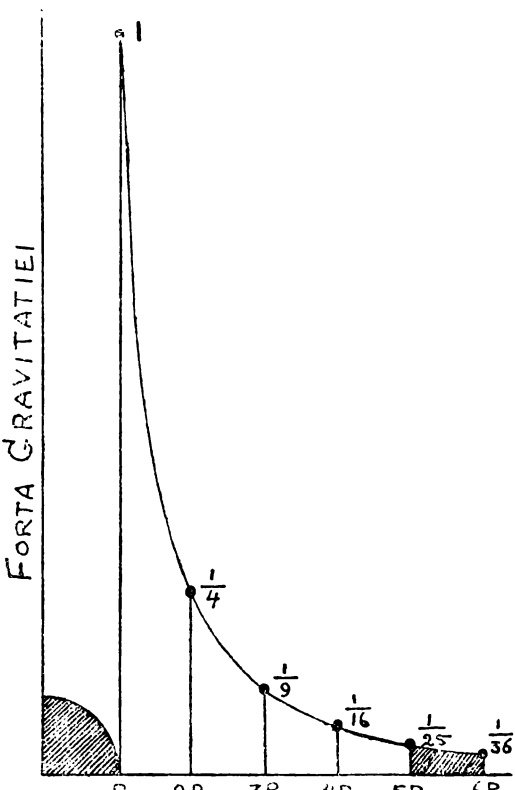
ORBITELE PLANETELOR

Acum după ce am învățat puțintel calculul infinitezimal, să încercăm să-l aplicăm la studiul mișcării corpurilor cerești naturale și artificiale sub influența forței gravitației. Mai întîi să calculăm viteza cu care trebuie să lansăm o rachetă de pe suprafața Pămîntului, pentru a scăpa de gravitația pămîntească care o înlănțuie.

Gîndiți-vă la hamalii care trebuie să urce un pian de la nivelul străzii la un anumit etaj dintr-un bloc de locuințe înalt. Toată lumea este de acord, și în special hamalii, că pentru a urca un pian trei etaje se depune un lucru mecanic de trei ori mai mare decît pentru a-l urca un etaj. Lucrul mecanic depus pentru transportarea unei mobile grele este de asemenea proporțional cu greutatea acesteia, căci, pentru a urca șase scaune, o persoană trebuie să facă un lucru mecanic de șase ori mai mare decît pentru a urca un singur scaun.

Toate acestea sînt, desigur, lucruri cunoscute, dar ce se poate spune despre lucrul mecanic necesar pentru a ridica o rachetă suficient de sus pentru a o lansa pe o orbită prestabilită sau cu lucrul mecanic de care e nevoie pentru a ridica racheta la o înălțime și mai mare, așa încît să cadă pe Lună? La rezolvarea problemelor de acest fel trebuie să avem în vedere că forța gravitației descrește cu creșterea distanței de la centrul Pămîntului; cu cît ridicăm obiectul mai sus, cu atît va fi mai ușor de a-l ridica și mai sus.

În fig. 11 se arată cum variază forța gravitației în raport cu distanța de la centrul Pământului. Pentru a calcula lucrul mecanic necesar transportării unui obiect de la suprafața Pământului (distanța R_0 de la centru) la distanța R,



11. Descreșterea forței gravitaționale cu creșterea distanței (R_0 este raza Pământului).

ținînd seama de descreșterea continuă a forței gravitației, împărțim distanța de la R_0 la R într-un număr mare de intervale mici dr și considerăm lucrul mecanic efectuat

de-a lungul acestor intervale. Întrucît pentru o mică variație a distanței forța gravitației poate fi considerată practic constantă (gîndiți-vă la hamali), lucrul mecanic efectuat este egal cu produsul dintre forța care deplasează obiectul și distanța parcursă, adică este egal cu aria dreptunghiului haşurat din fig. 11.

Trecînd la limita deplasărilor infinit de mici, tragem concluzia că lucrul mecanic total necesar pentru a ridica un obiect din R_0 în R este dat de aria de sub curba forței de atracție sau, cu notațiile din capitolul precedent, de integrala:

$$W = \int_{R_0}^{R} \frac{GMm}{r^2}\,\mathrm{d}r = GMm \int_{R_0}^{R} \frac{1}{r^2}\,\mathrm{d}r.$$

(Avînd în vedere că constantele nu sînt influențate de operația de integrare, putem să scoatem pe GMm de sub semnul integralei și să-l înmulțim cu rezultatul final al integrării.) Uitîndu-ne în tabelul de la pag. 40, găsim că integrala lui $\frac{1}{r^2}$ este $-\frac{1}{r}$ (deoarece derivata lui $\frac{1}{r}$ este $-\frac{1}{r^2}$). Așadar, lucrul mecanic efectuat este:

$$W = -\frac{GMm}{R} - \left(-\frac{GMm}{R_0}\right) = GMm\left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R}\right).$$

Expresia

$$P_R = -\frac{GM}{R}$$

(care se referă la unitatea de masă care urmează a fi ridicată) se numește *potențialul gravitațional* și spunem că lucrul mecanic efectuat pentru a ridica o masă egală cu unitatea de la suprafața Pămîntului la o anumită distanță în spațiu este egal cu diferența de potențial gravitațional dintre aceste două puncte.

Aceste raționamente simple îi erau cunoscute lui Newton încă din prima perioadă a activității sale, dar el întîmpina dificultăți mari cînd era vorba să explice legile exacte ale mișcării planetelor în jurul Soarelui și ale mișcării sateliților planetelor — legi care fuseseră descoperite cu mai bine de o jumătate de secol înaintea sa de către astronomul german, Johannes Kepler. Studiind mișcarea planetelor în raport cu stelele fixe, Kepler s-a folosit de datele obținute de profesorul său, Tycho Brahe. Kepler a stabilit că *orbitele tuturor planetelor sînt elipse, Soarele ocupînd unul din focare.*

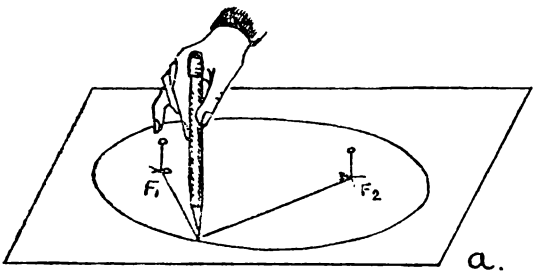
Vechii matematicieni greci au definit elipsa ca figura geometrică obținută prin secționarea unui con cu un plan înclinat față de axa conului; cu cît înclinarea planului este mai mare, cu atît elipsa este mai alungită. Dacă planul e perpendicular pe axă, elipsa degenerează într-un cerc. Altă definiție a elipsei este aceea de curbă închisă, avînd proprietatea că suma distanțelor de la fiecare din punctele ei pînă la două puncte fixe de pe axa mare, numite *focare*, este întotdeauna aceeași. Această definiție oferă o metodă comodă de a trasa o elipsă cu ajutorul a două ace și a unei sfori, așa cum se arată în fig. 12.

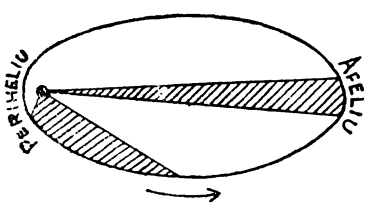
A doua lege a lui Kepler spune că *mișcarea planetelor pe orbitele lor eliptice are loc în așa fel, încît raza care unește Soarele cu planeta mătură arii egale în intervale de timp egale* (fig. 12).

În sfîrșit, a treia lege, pe care Kepler a publicat-o cu nouă ani mai tîrziu, spune că *pătratele perioadelor de revoluție ale diferitelor planete se găsesc în același raport cu cuburile distanțelor lor medii de la Soare.* Astfel, de exemplu, distanțele lui Mercur, Venus, Marte și Jupiter, exprimate prin distanțe de la Pămînt la Soare (așa-numita „unitate astronomică" de distanță), sînt respectiv: 0,387; 0,723; 1,524; 5,203, iar perioadele lor de rotație sînt de

0,241; 0,615; 1,881 și 11,860 ani. Ridicînd la cub primul șir de numere (distanțele) și la pătrat al doilea șir (perioadele), obținem rezultate numerice identice, și anume: 0,0580; 0,3785; 3,5396 și 140,85.

În primele sale studii, Newton a considerat, pentru simplificare, că orbita Lunii este perfect circulară și această





12. *a* — un mijloc simplu de a desena o elipsă; *b* — a doua lege a lui Kepler.

aproximație l-a condus la descoperirea legii „relativ elementară" a gravitației, care a fost prezentată în capitolul II. După ce, însă, a făcut acest prim pas, el a trebuit să dovedească că, dacă legea gravitației universale este absolut corectă, orbitele planetelor care diferă de un cerc trebuie

să fie elipse cu Soarele situat într-unul din focare. Același lucru se poate spune, desigur, și despre Lună, deoarece orbita ei nu este un cerc perfect, ci este o elipsă. Newton n-a putut aduce dovezi prin metodele geometriei clasice bazate exclusiv pe cercuri și linii drepte și, după cum s-a arătat mai înainte, a elaborat calculul diferențial în special cu scopul de a studia această problemă.

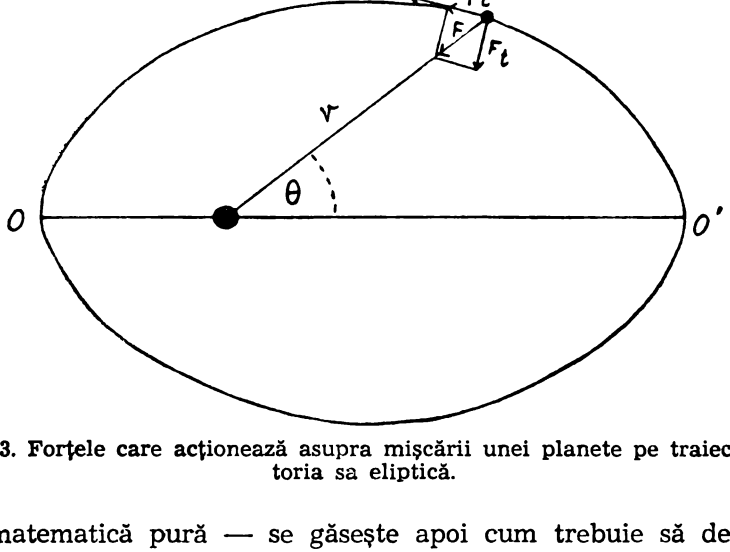
Elementele calculului diferențial date în capitolul precedent nu sînt suficiente pentru a putea reproduce demonstrația prin care Newton dovedea că orbitele planetelor trebuie să fie elipse, dar sperăm că expunerea de față va permite cititorului cel puțin să înțeleagă *cum* a rezolvat Newton această problemă.

În fig. 13 se arată mișcarea unei planete pe o anumită traiectorie OO' cu o anumită viteză v. Pentru mișcările de acest fel e convenabil să se definească poziția unei planete într-un moment oarecare, dînd distanța sa r de la Soare și unghiul θ pe care-l formează linia dusă de la Soare la planetă (raza vectoare) cu o direcție fixă în spațiu, să zicem cu direcția unei stele fixe oarecare din planul eclipticii. Poziția planetei fiind dată prin coordonatele r și θ, viteza de variație a poziției sale este dată de fluxiunile $\dot{r}$ și $\dot{\theta}$, iar rapiditatea de variație a vitezei (adică accelerația) va fi dată de „fluxiunile" de ordinul al doilea $\ddot{r}$ și $\ddot{\theta}$. Forța gravitației $F = \frac{GMm}{r^2}$ care acționează asupra planetei, în general vorbind, nu este perpendiculară pe orbita sa, cum ar fi în cazul mișcării circulare. Aplicînd regula adunării forțelor, putem descompune mișcarea în două componente: una F_l, dirijată după tangenta în punctul respectiv la orbită, și alta F_t, perpendiculară pe prima[1].

După ce am făcut acest lucru, făcînd uz de legea fundamentală a mecanicii stabilită de Newton, care spune că

[1] Indicii l și t reprezintă cuvintele ***longitudinal*** și ***transversal***.

accelerația în orice direcție este proporțională cu componenta forței pe acea direcție, obținem așa-numitele *ecuații diferențiale* ale mișcării planetei. Aceste ecuații dau relațiile dintre coordonatele r și θ, „fluxiunile" lor $\dot{r}$ și $\dot{\theta}$ și „fluxiunile" de ordinul al doilea $\ddot{r}$ și $\ddot{\theta}$. Restul este



13. Forțele care acționează asupra mișcării unei planete pe traiectoria sa eliptică.

matematică pură — se găsește apoi cum trebuie să depindă r și θ de timp pentru ca „fluxiunile" de ordinul întîi și al doilea, precum și ele însele să satisfacă ecuațiile diferențiale. Răspunsul este că mișcarea trebuie să aibă loc pe o elipsă avînd Soarele într-unul din focare, în așa fel încît raza vectoare să mărture arii egale în intervale de timp egale.

Deși n-am putut da aci decît „descrierea" modului cum au fost deduse primele două legi ale lui Kepler, putem arăta exact cum se deduce a treia lege a sa, făcînd ipoteza simplificatoare că orbitele planetelor sînt circulare. Într-adevăr, am văzut în capitolul II că accelerația centripetă

(îndreptată spre centru) a mișcării circulare este $\frac{v^2}{R}$, în care v este viteza corpului în mișcare, iar R este raza orbitei. Întrucît accelerația centripetă înmulțită cu masa trebuie să fie egală cu forța de atracție gravitațională, putem scrie:

$$\frac{mv^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}.$$

Pe de altă parte, dat fiind că lungimea orbitei circulare este $2\pi R$, perioada T a unei revoluții este dată, evident, de formula:

$$T = \frac{2\pi R}{v},$$

de unde rezultă

$$v = \frac{2\pi R}{T}.$$

Substituind această valoare a lui v în prima ecuație, obținem:

$$\frac{m4\pi^2R^2}{T^2R} = \frac{GMm}{R^2}$$

sau, rearanjînd și simplificînd cu m în ambii membri:

$$4\pi^2R^3 = GMT^2.$$

Asta-i tot! Formula spune că *cuburile lui R sînt proporționale cu pătratele lui T*, ceea ce este exact a treia lege a lui Kepler.

Printr-o aplicare riguroasă a calculului infinitezimal se poate arăta că aceeași lege este valabilă și pentru cazul mai general al orbitelor eliptice.

Astfel, inventînd matematica necesară pentru a rezolva problema care-l preocupa, Newton a putut demonstra că mișcările membrilor familiei Soarelui ascultă, într-adevăr, de legea gravitației universale.

PĂMÎNTUL E UN FEL DE SFÎRLEAZĂ CARE SE ROTEȘTE

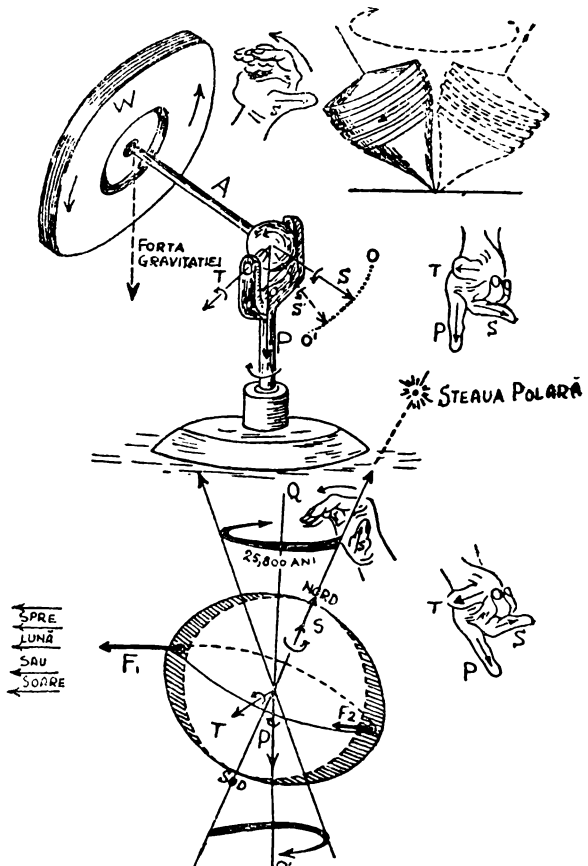
După ce a rezolvat problema modului în care forțele gravitației pămîntești țin Luna pe orbita ei și a modului în care gravitația Soarelui face ca Pămîntul și celelalte planete să se miște în jurul său pe o traiectorie eliptică, Newton și-a îndreptat atenția asupra influenței pe care o exercită aceste două corpuri cerești asupra rotației globului pămîntesc în jurul axei sale. El și-a dat seama că, din cauza rotației sale, Pămîntul trebuie să aibă forma unui sferoid turtit, deoarece gravitația în regiunea ecuatorială este parțial compensată de forța centrifugă. Într-adevăr, raza ecuatorului Pămîntului este cu circa 20 km mai lungă decît raza polară, iar accelerația gravitației la ecuator este cu 0,3% mai mică decît la poli. Așadar, Pămîntul poate fi considerat ca o sferă înconjurată de o umflătură la ecuator (suprafața hașurată din partea de jos a fig. 14), care are o grosime de circa 20 km la ecuator și se reduce la zero la poli. Pe cînd forțele de gravitație care acționează asupra părții sferice a Pămîntului sînt echivalente cu o singură forță aplicată în centrul acestuia, forțele care acționează asupra umflăturii de la ecuator nu se echilibrează în același mod. Într-adevăr, deoarece gravitația descrește cînd distanța crește, forța F_1 care acționează asupra părții umflăturii care e îndreptată spre corpul care exercită atracția (Soarele sau Luna) este mai mare decît forța F_2 care acționează asupra părții opuse. Rezultatul este că apare un *cuplu* de forțe sau un *moment* de răsu-

cire care tinde să îndrepte poziția axei de rotație a Pămîntului, făcînd-o perpendiculară pe planul orbitei (eclipticii) Pămîntului sau pe planul orbitei Lunii. Atunci de ce axa de rotație a Pămîntului nu se rotește cum ar trebui sub acțiunea acestor forțe?

Pentru a răspunde la această întrebare trebuie să înțelegem că globul pămîntesc este o sfîrleză uriașă, într-o mișcare asemănătoare cu aceea a acestei jucării pe care o cunoaștem cu toții din copilărie. Cînd i se imprimă o mișcare rapidă de rotație, sfîrleaza nu cade, cum s-ar părea că e natural, ci păstrează o poziție înclinată față de podea, iar în timp ce se învîrtește, axa de rotație descrie în jurul verticalei un con cu unghi mare la vîrf (fig. 14, colțul de sus din dreapta). Numai cînd, din cauza frecării, rotația sfîrlezei devine mai lentă, ea cade pe podea și se rostogolește sub canapea.

Un model ceva mai complicat, folosit la cursurile de mecanică teoretică, este reprezentat în jumătatea superioară a fig. 14. El constă dintr-o furcă *P*, care se poate roti în jurul unei axe verticale, în care e montată o tijă *A*, ce se poate mișca liber în sus și-n jos în jurul unei axe orizontale *T*. La capătul liber al acestei tije e montat un volant *W*, care se rotește cu frecare foarte mică pe un rulment cu bile. Dacă volantul este în repaus, poziția normală a sistemului este cu tija înclinată în jos și cu volantul sprijinindu-se pe masă. Dacă însă punem volantul în mișcare cu viteză mare, lucrurile se vor petrece în mod cu totul diferit, într-un mod aproape de necrezut pentru cineva care asistă la acest fenomen pentru prima oară. Tija cu volantul nu vor cădea în jos atîta timp cît acesta din urmă se rotește, iar sistemul format din tijă, volant și suportul în formă de furcă se va roti încet, în jurul axei sale verticale. Acesta este binecunoscutul principiu al *giroscopului*, care are numeroase aplicații practice, printre

care „busola giroscopică", cu care se dirijează vapoarele și avioanele și „stabilizatoarele giroscopice", care împiedică ruliul și tangajul pe timp de furtună.



14. Învîrtirea giroscopului și învîrtirea Pămîntului.

Se pare că cea mai amuzantă aplicație a giroscopului a fost aceea pe care i-a dat-o fizicianul francez Jean Perrin, care a băgat un giroscop de avion învîrtindu-se într-un

geamantan și l-a predat la bagaje în gara din Paris (pe vremea aceea nu existau linii aeriene comerciale). Cînd hamalul a luat geamantanul și, străbătînd cu el sălile gării, a încercat să treacă după un colț, geamantanul a refuzat să-l urmeze, iar cînd acesta uluit a încercat să-l forțeze să asculte, geamantanul s-a răsucit cu o violență neașteptată, astfel încît i-a sucit mîna (fig. 15). „Parcă ar fi dracul înăuntru!" a strigat hamalul și speriat a trîntit geamantanul luînd-o la fugă. Un an mai tîrziu, Jean Perrin a fost distins cu Premiul Nobel, dar nu pentru experiența sa cu giroscopul, ci pentru lucrările sale asupra mișcării termice a moleculelor.

Pentru a înțelege comportarea ciudată a giroscoapelor trebuie să ne familiarizăm cu reprezentarea vectorială a mișcării de rotație. În capitolul I am văzut că viteza mișcării de translație poate fi reprezentată printr-o săgeată (vector) avînd direcția și sensul mișcării și o lungime proporțională cu viteza. În cazul rotației se aplică o metodă similară. Ducem săgeata de-a lungul axei de rotație, lungimea săgeții corespunzînd vitezei unghiulare măsurată în rot/min (rotații pe minut) sau în orice altă unitate echivalentă. Sensul săgeții se stabilește cu ajutorul regulii convenționale a „mîinii drepte": *Dacă puneți degetele îndoite ale mîinii drepte în sensul rotației, degetul cel mare arată sensul corect al săgeții.* (Această regulă este foarte ușor de aplicat și atunci cînd încercați să deșurubați capacul unui borcan de sticlă sau ceva similar.) În partea superioară a fig. 14, vectorul S arată viteza de rotație a volantului. Cuplul (momentul de răsucire) datorit gravitației e reprezentat prin vectorul T, care trece prin articulațiile furcii. Extinzînd legile mișcării de translație la cazul mișcării de rotație, e de așteptat ca variația vitezei unghiulare să fie proporțională cu cuplul aplicat. Așadar, efectul gravitației asupra unei sfîrleze care se rotește

constă în schimbarea vitezei de rotație dată de vectorul S în aceea dată de vectorul S', adică rotația în jurul axei verticale. Este exact ceea ce se observă în comportarea unei sfîrleze care se învîrtește.

15. Experiența lui Perrin.

Relația în spațiu dintre viteza unghiulară, cuplu și mișcarea rezultantă este arătată de mîinile din fig. 14. Dacă îndreptați degetul mijlociu al mîinii drepte în sensul vectorului rotației, iar degetul cel mare în sensul vectorului

cuplului, degetul arătător va indica rotația rezultantă a sistemului.

Fenomenul pe care l-am descris imediat mai sus se numește *precesie* și este comun tuturor corpurilor care se rotesc, fie ele stele sau planete, jucării de copii sau electroni într-un atom. În mișcarea Pămîntului, precesia este cauzată de atracția gravitațională a Soarelui și a Lunii, aceasta din urmă jucînd primul rol, deoarece, deși are o masă mai mică decît Soarele, este mult mai apropiată de Pămînt. Efectul combinat al precesiei datorite Lunii și Soarelui face ca axa Pămîntului să se rotească cu 50 de secunde de unghi pe an și o face să parcurgă un cerc complet în 25 800 de ani. Acest fenomen, căruia i se datoresc modificările lente ale datelor la care încep primăvara și toamna (precesia echinocțiilor), a fost descoperit de astronomul grec Hiparh prin anul 125 î.e.n., dar explicația lui n-a putut fi dată pînă ce Newton nu și-a formulat teoria gravitației universale.

CAPITOLUL VI

MAREELE

Altă influență și mai importantă a Soarelui și a Lunii asupra Pămîntului este deformarea zilnică a formei Pămîntului, care se manifestă în modul cel mai vizibil prin fenomenul mareelor. Newton și-a dat seama că ridicarea și scăderea periodică a nivelului oceanului se datoresc atracției gravitaționale exercitate de Soare și de Lună asupra apelor oceanului, influența Lunii fiind mult mai mare, deoarece Luna, deși mult mai mică decît Soarele, se găsește mult mai aproape de noi. Argumentul lui era că, întrucît forțele de gravitație descresc pe măsură ce distanța crește, atracția exercitată asupra apei oceanului de pe partea luminată de Lună sau de Soare a globului nostru este mai mare decît aceea de pe partea opusă și, prin urmare ea trebuie să ridice apa deasupra nivelului său normal.

Multe persoane care aud pentru prima dată această explicație a mareelor găsesc că e greu de înțeles de ce există două valuri de maree, unul pe partea îndreptată spre Lună sau spre Soare, și altul pe partea opusă, unde apele oceanului par că se deplasează în sens opus atracției gravitației. Pentru a explica acest fenomen trebuie să analizăm mai amănunțit dinamica sistemului Pămînt-Lună.

Dacă Luna ar fi fixată într-o poziție dată, să zicem pe vîrful unui turn uriaș ridicat într-un punct oarecare de pe suprafața Pămîntului sau dacă Pămîntul însuși ar fi ținut într-un punct oarecare al orbitei sale de către o forță supranaturală, apele oceanului s-ar aduna, într-adevăr, pe

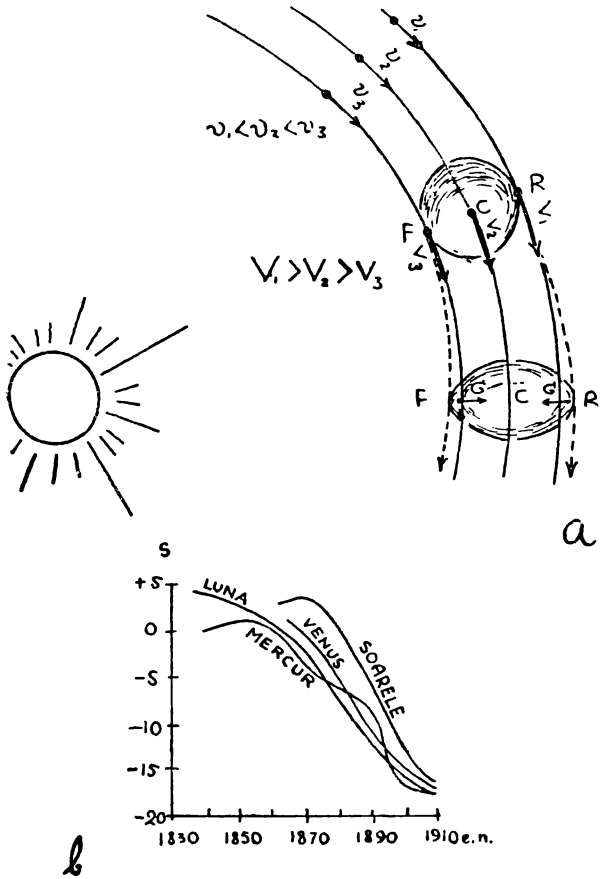
o parte a Pămîntului și s-ar produce o scădere a nivelului oceanului pe partea opusă. Dar întrucît Luna se rotește în jurul Pămîntului, iar Pămîntul în jurul Soarelui, situația este cu totul diferită.

Să examinăm mai întîi mareele datorite Soarelui. Dat fiind că, în timpul mișcării sale în jurul Soarelui, Pămîntul formează un tot indivizibil, viteza liniară a părții îndreptate spre Soare (punctul *F* din fig. 16, *a*) este mai mică decît viteza liniară a centrului *C* al Pămîntului, care, la rîndul său, este mai mică decît viteza liniară a părții opuse lui *F* (punctul *R*). Pe de altă parte, după cum am văzut în capitolul IV, vitezele liniare în mișcarea circulară orbitală sub acțiunea gravitației solare trebuie să descrească pe măsură ce distanța de la Soare crește. Așadar, punctul *F* are o viteză liniară mai mică decît e necesar pentru a menține mișcarea circulară și deci va avea tendința să se abată spre Soare, așa cum arată săgeata punctată în fig. 16, *a* care pornește din *F*. În mod asemănător, punctul *R* are o viteză liniară mai mare decît cea necesară pentru orbita sa circulară și va avea tendința să se depărteze de Soare (vezi săgeata punctată pornind din *R*).

Așadar, dacă n-ar exista atracția dintre diferitele părți ale materiei din care este format Pămîntul, el s-ar rupe în bucăți, care s-ar răspîndi sub formă de disc plat în tot planul eclipticii. Acest lucru nu se întîmplă însă din cauză că atracția gravitației *G* dintre diferitele părți ale Pămîntului le ține strîns unite. În schimb, globul pămîntesc se alungește în direcția razei orbitei, formînd două umflături de ambele părți ale acesteia.

Dacă examinăm mareele lunare, raționamentul este exact același, ținînd seamă că atît Pămîntul, cît și Luna se mișcă în jurul centrului comun de greutate al lor. Întrucît Luna este de circa 80 de ori mai ușoară decît Pămîntul, centrul comun de greutate al acestor două corpuri este situat la o

distanță de la centrul Pământului egală cu a 80-a parte din distanța de la Pământ la Lună. Avînd în vedere că această distanță este egală cu 60 de raze ale Pământului, tragem



16. *a* — originea forței mareelor; *b* — întîrzierea aparentă a mișcării corpurilor cerești.

concluzia că centrul de greutate al sistemului Pământ-Lună este situat la 60/80 = 3/4 din raza Pământului măsurată

de la centrul acestuia. Cu toate că, din punct de vedere geometric, există o diferență cantitativă, raționamentul fizic rămîne în picioare. Apele oceanelor Pămîntului formează două umflături, una îndreptată de la centrul Pămîntului spre centrul de greutate comun (care reprezintă și direcția spre Lună), iar cealaltă în sens opus.

Cînd Soarele, Pămîntul și Luna sînt situate pe aceeași linie — adică în perioadele de Lună nouă și de Lună plină —, efectele de maree ale Lunii și Soarelui se adună, iar mareele sînt deosebit de înalte. În timpul primului și ultimului pătrar, mareele înalte lunare coincid cu mareele joase solare, iar efectul lor total este mai redus.

Deoarece Pămîntul nu este absolut rigid, forțele combinate lunare și solare care produc mareele îi deformează învelișul solid, aceste deformări sînt însă mult mai mici decît acelea care se produc în învelișul lichid. Fizicianul american A. A. Michelson[1] a stabilit experimental că la fiecare 12 ore, suprafața Pămîntului se deformează cu circa 30 cm în comparație cu deformația de 120—150 cm a suprafeței oceanului. Avînd în vedere că deformațiile scoarței Pămîntului au loc încet și progresiv, nu ne dăm seama că trăim pe un fundament care se clatină, dar cînd observăm fluxul oceanului ridicîndu-se spre țărmul continentelor, trebuie să ținem seama că ceea ce vedem este doar *diferența* dintre mișcările verticale ale Pămîntului și apei.

Mareele oceanelor, care se deplasează în jurul globului se freacă de fundul oceanelor (în special în bazinele cu adîncime mică, cum este Marea Bering) și se lovesc de țărmurile continentelor. Aceste fenomene determină pierderi de energie care se manifestă prin slăbirea intensității

[1] Vezi Bernard Jaffe, ***Michelson și viteza luminii***, în colecția „Science Study Series", 1960.

mareelor. Englezii Sir Harold Jeffreys și Sir Geoffrey Taylor au evaluat că puterea totală pe care o desfășoară neîncetat mareele se ridică la circa 2 miliarde cai-putere. Datorită acestei pierderi de energie, rotația Pămîntului în jurul axei sale se încetinește, așa după cum roțile unui automobil își încetinesc mișcarea cînd se pune frîna. Comparînd această pierdere de energie provocată de maree cu energia totală de rotație a Pămîntului, găsim că mișcarea globului terestru în jurul axei sale devine mai lentă, adică durata unei rotații devine cu 0,000 000 02 s mai lungă decît cea precedentă. Această modificare este foarte mică și nu poate fi măsurată de azi pe mîine sau de la un an la celălalt. Dar, pe măsură ce trec anii, aceste diferențe se acumulează. Astfel, într-o sută de ani sînt 36 525 de zile, așa încît acum un secol zilele erau cu 0,000 7 s mai scurte decît în prezent. În medie, în acest interval de timp ziua a fost cu 0,000 35 s mai scurtă decît în zilele noastre. Eroarea totală acumulată în acest timp este de: $36\,525 \times 0{,}000\,35 = 14$ s.

Cifra de 14 s pe secol este mică, dar ea se încadrează perfect în precizia observațiilor și calculelor astronomice. În realitate, această încetinire a rotației Pămîntului în jurul axei sale explică o nepotrivire care multă vreme a pus în încurcătură pe astronomi. Într-adevăr, comparînd pozițiile Soarelui, Lunii, ale lui Mercur și Venus în raport cu stelele fixe, astronomii au observat că ele păreau în mod sistematic *în avans,* în ce privește timpul, față de pozițiile lor de acum un secol determinate pe baza mecanicii cerești (fig. 16, *b*). Dacă un program de televiziune începe cu 15 min mai devreme decît v-ați fi așteptat, dacă găsiți un magazin închis cînd sosiți cu circa 15 min înainte de ora de închidere și dacă pierdeți trenul cînd erați siguri că-l veți prinde, nu trebuie să dați vina pe postul de radio, pe magazin sau pe căile ferate, ci pe ceasorni-

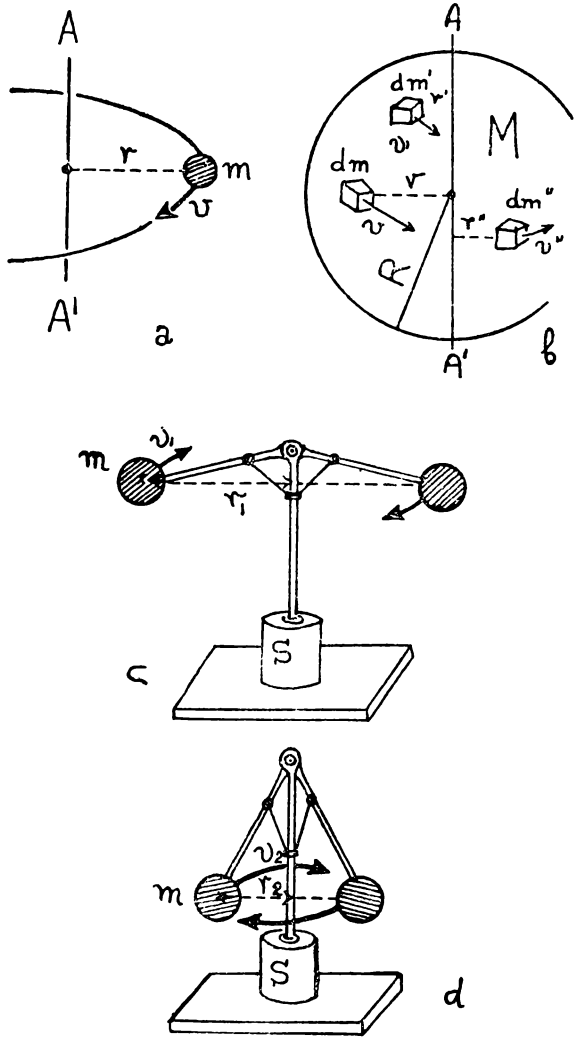
cul dv. El a rămas, probabil, în urmă cu 15 min. Tot astfel, diferența de 15 s în măsurarea timpului cînd au loc evenimentele astronomice trebuie să fie atribuită încetinirii rotației Pămîntului, și nu accelerării vitezei tuturor corpurilor cerești. Pînă cînd s-a descoperit încetinirea rotației Pămîntului, astronomii îl considerau ca un ceasornic perfect, de care se foloseau în măsurătorile lor. În prezent, se introduc corecții, care prevăd modificările cauzate de maree.

La începutul secolului nostru, astronomul englez George Darwin, fiul celebrului autor al *Originii speciilor*, s-a apucat să studieze problema modului în care, după trecerea unui timp îndelungat, pierderea de energie prin fricțiunea mareelor influențează sistemul format din Pămînt și Lună.

Pentru a înțelege raționamentul lui Darwin trebuie să fim familiarizați cu o mărime mecanică importantă, cunoscută sub numele de *moment cinetic* al unui corp material care se rotește în jurul axei proprii sau al unei axe exterioare. Să considerăm o masă m rotindu-se cu viteza v în jurul unei axe fixe AA', la o distanță r de aceasta (fig. 17, *a*). Această masă poate fi aceea a Pămîntului rotindu-se în jurul Soarelui, a Lunii rotindu-se în jurul Pămîntului sau a unei pietre legate de o sfoară pe care un copil o învîrtește. Momentul cinetic I se definește ca produsul masei corpului cu viteza sa și cu distanța de la axă:

$$I = mvr.$$

Situația devine ceva mai complicată cînd considerăm un corp material, fie că e vorba de un volant sau de Pămînt, care se rotește în jurul unei axe care trece prin centrul său (fig. 17, *b*). Pe cînd în cazul precedent toate părțile corpului se mișcă aproximativ cu aceeași viteză (atîta timp cît mărimea corpului este mică în com-



17. Momentul cinetic al unui corp care se roteşte în jurul axei proprii sau al unei **axe exterioare** este (*a*) produsul masei m a corpului cu viteza v şi distanţa sa r de la axa de rotaţie. Calculul momentului cinetic al unui corp rigid (*b*) care se roteşte se face însumînd momentele cinetice ale unui număr infinit de fragmente mici, de exemplu dm, dm', dm'' etc. Variaţia vitezei impusă de conservarea momentului cinetic este ilustrată în (*c*) şi (*d*).

paraţie cu dimensiunile orbitei), diferitele părţi ale unui corp care se roteşte în jurul unei axe trecînd prin centrul său au viteze cu totul diferite; cu cît o parte este mai depărtată de axa de rotaţie, cu atît ea se mişcă mai repede. În cazul Pămîntului, de exemplu, punctele de la ecuator au viteze mult mai mari decît punctele de la Cercul Arctic şi Cercul Antarctic, iar punctele de la poli nu se mişcă de loc. Cum putem deci defini momentul cinetic în acest caz? Procedeul de care vom face uz este, desigur, calculul integral.

Împărţim întreaga masă m a corpului într-un mare număr de fragmente mici dm, dm', dm'' etc. şi calculăm momentul cinetic pentru fiecare din ele. Cele trei fragmente reprezentate în fig. 17, *b* sînt situate la distanţele r, r', r'', de la axă şi au vitezele v, v' şi v'', care sînt, desigur, proporţionale cu aceste distanţe. Pentru a obţine momentul cinetic I al întregului corp, trebuie să *integrăm* momentele cinetice ale tuturor fragmentelor scriind:

$$I = \int dm_i v_i r_i,$$

în care integrarea se extinde la întregul corp. Aplicînd calculul infinitezimal, se poate arăta că

$$I = \frac{2}{5} v_r R,$$

în care R este raza corpului care se roteşte, iar v_r este viteza punctelor de la ecuatorul său.

Una din legile fundamentale ale mecanicii clasice, dedusă de Newton, este *legea conservării momentului cinetic*, care spune că dacă avem un număr oarecare de corpuri care se rotesc în jurul axelor lor şi în acelaşi timp şi unul în jurul altuia, *momentul cinetic total al sistemului trebuie să rămînă întotdeauna constant.*

O demonstrație elementară didactică a acestei legi se poate face folosindu-se dispozitivul prezentat în partea de jos a fig. 17. El constă din două greutăți montate prin două tije articulate la capătul superior al unei axe verticale, care se poate roti cu frecare foarte mică într-o bucșă *S*. Un dispozitiv special (neprezentat în figură) ne permite să ridicăm sferele în sus (fig. 17, *c*) sau să le coborîm (fig. 17, *d*).

Să presupunem că după ce am fixat greutățile în poziția de sus (fig. 17, *c*), dăm sistemului o mișcare de rotație liberă în jurul axei sale, imprimîndu-i astfel un moment cinetic de o anumită mărime. În conformitate cu definiția de mai înainte, momentul cinetic al fiecărei sfere va fi egal cu mv_1r_1, în care v_1 și r_1 au înțelesul indicat în fig. 17, *c*. În timp ce sistemul se rotește în virtutea inerției, lăsăm în jos sferele în poziția indicată în fig. 17, *d*, așa încît noua lor distanță r_2 devine egală cu jumătate din distanța r_1 anterioară. Întrucît mvr nu trebuie să varieze, descreșterea lui r cu factorul 2 trebuie să aibă ca rezultat o creștere a lui v cu același factor. Așadar, legea conservării momentului cinetic cere ca viteza să se dubleze și, într-adevăr, se observă în cazul al doilea că $v_2 = 2v_1$.

Acest principiu se aplică în scopul producerii unor efecte uimitoare de către acrobații de circ, de patinatorii artistici etc. Rotindu-se pe o frînghie sau pe gheață cu viteză relativ redusă, cu brațele întinse lateral în ambele direcții, ei își apropie brusc brațele de corp, devenind astfel niște vîrtejuri sclipitoare.

Revenind la sistemul Pămînt-Lună, conchidem că legea conservării momentului cinetic cere ca încetinirea rotației Pămîntului în jurul axei sale din cauza fricțiunii mareelor să aibă neapărat ca rezultat o creștere egală a momentului cinetic al Lunii în mișcarea sa orbitală în jurul Pămîntului.

Cum influențează această creștere a momentului cinetic mișcarea Lunii? Momentul cinetic al mișcării orbitale a Lunii este:

$$I = mvr,$$

în care m este masa Lunii, v este viteza ei, iar r este raza orbitei. Pe de altă parte, legea gravitației descoperită de Newton, combinată cu formula forței centrifuge, ne dă:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

în care M este masa Pământului. Așadar:

$$\frac{GM}{r} = v^2.$$

Din această expresie și din cea de mai sus a lui I rezultă:

$$r = \frac{I^2}{GMm^2}$$

și

$$v = \frac{GMm}{I};$$

cititorul poate să-l creadă pe autor pe cuvînt, dacă nu poate deduce el însuși aceste formule. Din ele rezultă că: *creșterea momentului cinetic al Lunii în timpul mișcării sale în jurul Pământului trebuie să aibă ca efect creșterea distanței sale de la Pământ și descreșterea vitezei sale liniare.*

Din încetinirea observată a rotației Pământului se poate calcula că recesia (retragerea) Lunii se ridică la 8 mm pe fiecare rotație. Așadar, de fiecare dată cînd vedeți Luna nouă, ea se găsește cu această cantitate mai departe de Pământ. Variația de 8 mm pe lună este o variație infimă pe scara distanțelor astronomice, dar sistemul Pământ-Lună există, probabil, de miliarde de ani. Interpretînd aceste date, George Darwin a găsit că acum patru sau

cinci miliarde de ani, Pămîntul și Luna trebuie să fi fost foarte apropiate între ele și a omis ipoteza că inițial acestea au format un singur corp (să-i zicem Pămlun sau Lunpăm). Ruperea în două bucăți s-ar putea să fi fost cauzată de forța mareelor provocate de gravitația solară sau de vreo catastrofă a sistemului solar pierdută în negura timpurilor. Ipoteza lui Darwin este sursa unui dezacord violent între oamenii de știință care se ocupă de originea Lunii. Unii oameni de știință sînt adepții ei înflăcărați — cel puțin din cauza frumuseții acestei ipoteze —, alții sînt dușmanii ei înverșunați.

Am mai putea spune încă cîteva cuvinte despre viitorul Lunii, așa cum poate fi prevăzut din calculele efectuate pe baza principiilor mecanicii cerești. În urma recesiei treptate, Luna va ajunge la un moment dat așa de departe de Pămînt, încît va deveni aproape inutilă ca înlocuitoare a iluminării artificiale nocturne. Între timp, mareele provocate de Soare vor face ca rotația Pămîntului să devină din ce în ce mai lentă (cu condiția ca oceanele să nu înghețe) și va veni o vreme cînd *lungimea unei zile va fi mai mare decît lungimea unei luni.* Atunci fricțiunea mareelor provocate de Lună va tinde să accelereze rotația Pămîntului și, conform legii conservării momentului cinetic, Luna va începe să revină spre Pămînt pînă ce, în cele din urmă, va ajunge așa de apropiată de el cum a fost cînd s-a născut. În acest moment, forțele gravitației terestre vor face, probabil, ca Luna să se sfărîme într-un număr imens de fragmente, care vor forma un inel asemănător cu acela al lui Saturn. Datele la care vor avea loc aceste evenimente, așa cum le stabilește mecanica cerească, sînt însă așa de depărtate, încît e posibil ca pînă atunci Soarele să-și consume tot combustibilul nuclear și întregul sistem planetar să fie cufundat în întuneric.

IZBÎNZILE MECANICII CEREŞTI

În interval de un secol, din sămînța aruncată de Newton prin formularea legii gravitației universale și prin inventarea calculului infinitezimal a crescut o pădure deasă și frumoasă. În calculele marilor matematicieni francezi, ca Joseph Louis Lagrange (1736—1813) și Pierre Simon Laplace (1749—1827), mecanica cerească a ajuns la o perfecțiune nemaiatinsă pînă la ei. Pornind de la simplitatea legilor mișcării planetelor formulate de Kepler, legi care ar fi fost exacte dacă planetele s-ar mișca exclusiv sub influența gravitației solare, teoria a progresat pînă a ajuns la un înalt grad de complexitate prin considerarea interacțiunilor sau *perturbațiilor* reciproce dintre planete. Deoarece masele planetelor sînt mult mai mici decît masa Soarelui, perturbațiile mișcărilor lor din cauza interacțiunii gravitaționale reciproce sînt foarte mici, dar această interacțiune nu poate fi neglijată dacă vrem să obținem o precizie comparabilă cu aceea atinsă în măsurătorile astronomice precise. Astfel de calcule necesită un volum enorm de muncă și de timp (astăzi aceste operații se efectuează mult mai rapid cu ajutorul calculatoarelor electronice). De exemplu, astronomul american E.W. Brown a studiat timp de aproape 20 de ani cîteva mii de termeni din lunga serie matematică pentru calculul datelor cuprinse în lucrarea sa *Tabelele Lunii* publicată în trei volume, in-cvarto.

Aceste studii migăloase au dat adeseori rezultate rodnice. Aproape de mijlocul secolului trecut, astronomul francez J.J. Leverrier, comparînd calculele pe care le făcea asupra mișcării planetei Uranus, descoperită în mod întîmplător în 1781 de William Herschel, cu pozițiile acestei planete observate în cei 63 de ani care trecuseră de la descoperirea ei, a constatat că ceva nu era în ordine. Diferențele dintre observații și calcule erau supărător de mari, aproape 20 de secunde de unghi (unghiul subîntins de o persoană situată la distanța de aproximativ 15 km), iar această diferență nu putea fi datorită vreunei erori de observație sau teoretice. Leverrier bănuia că diferențele semnalate se datorau perturbațiilor cauzate de vreo planetă necunoscută din exteriorul orbitei lui Uranus și s-a apucat să calculeze cît de mare trebuie să fie masa acestei planete ipotetice și cum ar trebui să se miște spre a justifica abaterile observate în mișcarea lui Uranus. În toamna anului 1846, Leverrier scria lui J. G. Galle, de la observatorul din Berlin: „Îndreptați-vă telescopul spre punctul cu longitudinea 326° de pe ecliptică din constelația Vărsătorul și veți găsi într-o vecinătate de un grad de acest punct o nouă planetă, ca o stea cam de mărimea a noua, avînd un disc perceptibil".

Galle a urmat aceste instrucțiuni. Noua planetă, care a primit numele de Neptun, a fost găsită în noaptea de 23 septembrie 1846. Englezul J. C. Adams împarte cu Leverrier cinstea descoperirii prin calcul a planetei Neptun, dar T. Challis de la Observatorul Universității din Cambridge, căruia Adams i-a comunicat rezultatele calculelor sale, nu s-a prea grăbit cu cercetările, pierzînd astfel ocazia de a fi coautorul acestei descoperiri.

Povestea s-a repetat, într-o formă mai puțin dramatică, în prima jumătate a secolului nostru. Astronomii americani W. H. Pickering, de la Observatorul Harward, și Percival

Lowell, fondatorul Observatorului Lowell din Arizona, susținea spre sfîrșitul deceniului al treilea că perturbațiile mișcărilor lui Uranus și Neptun indicau existența unei noi planete dincolo de Neptun. A fost nevoie însă de mai bine de zece ani pînă ce această planetă, care a primit denumirea de Pluto, și care s-ar putea să fie un satelit rătăcit al lui Neptun, să fie descoperită efectiv în 1930 de către C. W. Tombaugh, de la Observatorul Lowell. Se pare că chestiunea dacă această descoperire se datorește realmente unei preziceri sau cercetărilor sistematice migăloase este controversată.

Alt exemplu interesant de exactitate a rezultatelor mecanicii cerești este folosirea calculului datelor eclipselor de Soare și de Lună în scopul stabilirii datelor evenimentelor menționate de istorie. În 1887, astronomul austriac Theodor von Oppolzer a publicat tabele conținînd date calculate asupra tuturor eclipselor de Soare și de Lună din trecut, începînd din anul 1207 î.e.n., și asupra tuturor celor viitoare pînă în anul 2162 — în total vreo 8 000 de eclipse de Soare și 5 200 de eclipse de Lună. Folosind aceste date, constatăm, de exemplu, că calendarul nostru este în urmă cu patru ani. Într-adevăr, după documentele istorice, Luna a avut o eclipsă, în semn de „doliu" la moartea regelui Irod al Iudeii, care în ultimul an al domniei sale a poruncit să fie uciși toți copiii din cetatea Betleemului, sperînd că printre ei se găsește și pruncul Cristos. După tabelele lui Oppolzer, singura eclipsă de Lună care se potrivește cu aceste fapte a avut loc la 13 martie (vineri?) anul 3 î.e.n., de unde tragem concluzia că Iisus Cristos s-a născut cu patru ani mai devreme decît arată calendarul nostru obișnuit.

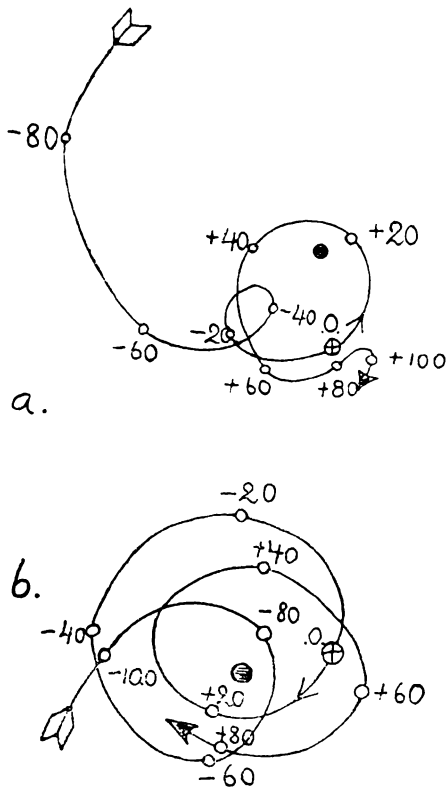
Alte exemple de eclipse care coincid cu evenimente de importanță istorică sînt acelea din 6 aprilie 648 î.e.n., care ne permit să fixăm cu certitudine cea mai veche dată

din cronologia greacă, și eclipsa din anul 911 î.e.n., care stabilește cronologia Asiriei antice.

Un deosebit interes prezintă pentru noi locuitorii Pământului, calculul perturbațiilor orbitei Pământului produse de alte planete. Elipsa pe care se mișcă Pământul în jurul Soarelui nu rămîne invariabilă, cum ar trebui să fie dacă Pământul ar fi o planetă unică, ci se clatină și pulsează sub influența forțelor gravitaționale ale celorlalți membri ai sistemului solar. Am văzut în capitolul V că precesia datorită Lunii și Soarelui face ca axa de rotație a globului nostru să descrie în spațiu o suprafață conică cu perioada de 25 800 de ani. În plus, orbita Pământului își modifică încet excentricitatea și înclinarea în spațiu sub influența forțelor de gravitație exercitate de alte planete ale sistemului solar. Modificările rezultate pot fi calculate cu mare precizie prin metodele mecanicii cerești; ele sînt reprezentate în fig. 18 pentru 100 000 de ani în urmă și 100 000 de ani în viitor. Partea de sus a acestei figuri dă modificările excentricității orbitei Pământului și rotația axei mari a acestei orbite. Deși orbita Pământului este eliptică, ea diferă foarte puțin de un cerc, așa că focarul ei este foarte apropiat de centrul geometric al elipsei. Cercul alb care se deplasează reprezintă mișcarea focarului în raport cu centrul orbitei (punctul negru mare). Cînd cele două puncte se găsesc la distanță mare unul de altul, excentricitatea orbitei este mare; cînd ele sînt apropiate unul de altul, excentricitatea este mică, iar dacă cele două puncte ar coincide, elipsa ar deveni un cerc. La scara acestei diagrame, diametrul orbitei însăși ar fi de circa 75 cm.

Figura 18, *b* dă variația înclinării orbitei în raport cu un plan invariabil în spațiu. Punctele acestei curbe reprezintă mișcarea punctului de intersecție a unei perpendiculare pe planul orbitei cu sfera stelelor fixe.

Observăm că acum 80 000 de ani, excentricitatea orbitei Pământului era destul de mare și că acum este mult mai mică (cercul cu cruce), iar peste 20 000 de ani va deveni și mai mică.



18. Variația excentricității (*a*) și a înclinației (*b*) orbitei Pământului cauzată de perturbațiile planetare. Cifrele indică mii de ani în trecut sau în viitor.

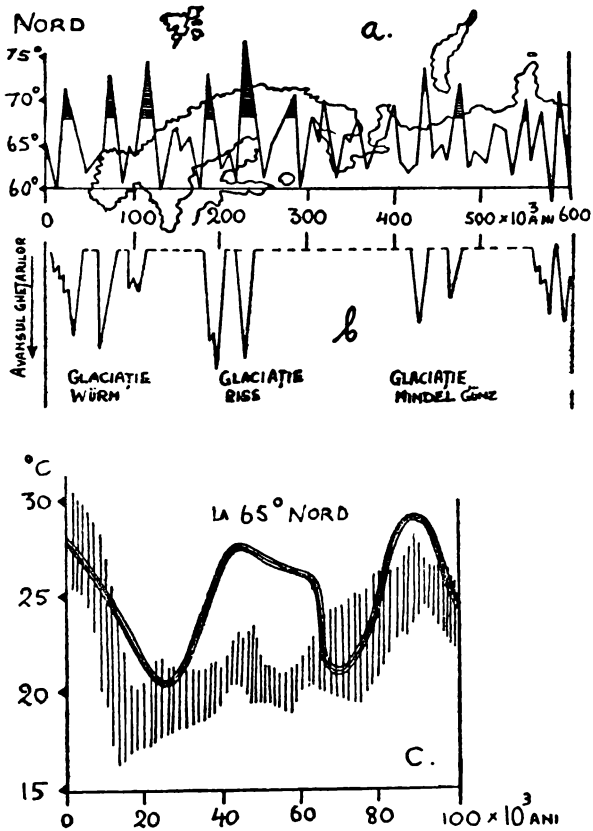
Variațiile orbitei Pământului au o influență profundă asupra climei globului nostru. Creșterea excentricității modifică raportul dintre distanța minimă și cea maximă de

la Soare, ceea ce face să crească diferența dintre temperatura din timpul verii și cea din timpul iernii. Creșterea înclinării axei Pămîntului față de planul orbitei sale face de asemenea să crească diferențele dintre vară și iarnă, deoarece știm că dacă axa de rotație a Pămîntului ar fi perpendiculară pe orbita sa, temperatura Pămîntului ar fi constantă în tot timpul anului.

Astronomul sîrb M. Milankovici a încercat, în 1938, să explice perioadele glaciale în timpul cărora calotele de gheață avansau și se retrăgeau periodic din nord, acoperind și descoperind șesul din zona cu latitudini mijlocii. Milankovici a urmat calculele lui Leverrier, asemănătoare cu cele prezentate în fig. 18 pentru o perioadă de 600 000 de ani în urmă. Ca punct de reper, Milankovici a luat cantitatea de căldură solară care cade acum pe unitatea de suprafață în lunile de vară la latitudinea nordică de 65° și a calculat pentru diferite ere cît de departe ar trebui să se deplaseze cineva spre nord sau spre sud pentru a găsi aceeași cantitate de căldură. Rezultatele acestor calcule sînt date în fig. 19, *a*, curba suprapunîndu-se pe conturul țărmurilor de nord ale Eurasiei. Maximele mari indică o scădere esențială a căldurii solare, pe cînd minimele indică creșteri ale acestei călduri. Astfel, de exemplu, acum ceva mai mult de 100 000 de ani, cantitatea de căldură primită la latitudinea nordică de 65° (în Norvegia centrală) era comparabilă cu aceea primită astăzi la latitudinea insulelor Spitzbergen. Pe de altă parte, nu mai departe decît acum 10 000 de ani, Norvegia centrală avea clima solară actuală a orașelor Oslo și Stockholm. Curba din fig. 19, *b* reprezintă avansarea spre sud a calotei glaciale indicată de datele geologice și observăm că cele două curbe concordă, într-adevăr, în mod izbitor.

Curba din fig. 19, *c*, corespunzînd numai ultimilor 100 000 de ani, a fost publicată în 1956 de Hans Suess, de

la Universitatea din California, și reprezintă temperatura apelor oceanului în timpul erelor geologice trecute, evaluată printr-o metodă ingenioasă propusă pentru prima



19. Comparația curbelor climatice ale lui Milankovici (*a*) cu avansarea ghețarilor în trecut (*b*) și cu paleotemperaturile oceanului (*c*).

oară în 1951 de celebrul om de știință american Harold Urey. Această metodă se bazează pe faptul că raportul dintre izotopul greu și cel ușor al oxigenului (O^{81} și O^{16})

în depunerile sedimentare de carbonat de calciu ($CaCO_3$) pe fundul oceanului depinde de temperatura apei oceanului în momentul sedimentării. Aşadar, măsurîndu-se raportul O^{18}/O^{16} în depunerile de la diferite adîncimi sub nivelul fundului oceanului, se poate determina temperatura apei de acum o sută de mii de ani cu aceeaşi certitudine cu care se poate măsura cu un termometru coborît în apă de pe vapor. Curba temperaturii apei oceanului stabilită de Suess pentru ultimii 100 000 de ani concordă destul de bine cu partea curbei temperaturii calculate de Milankovici pentru aceeaşi perioadă. Aşadar, cu toată obiecţia unor climatologi că „o diferenţă de temperatură de cîteva grade nu putea să cauzeze perioadele glaciale", se pare că, în definitiv, bătrînul sîrb avea dreptate. Prin urmare, trebuie să conchidem că deşi planetele nu influenţează viaţa indivizilor (cum pretind astrologii), ele influenţează cu certitudine viaţa omului, a animalelor şi plantelor în lunga desfăşurare a istoriei geologice.

CUM SE POATE SCĂPA DE GRAVITAȚIE

„Orice urcuș are și coborîș" este o zicală clasică, dar care nu mai este adevărată. Unele din rachetele lansate în ultimii ani de pe suprafața Pămîntului au devenit sateliți artificiali ai Pămîntului cu viață infinit de lungă, pe cînd altele s-au pierdut pentru totdeauna în întinderile nesfîrșite ale spațiului interplanetar. Folosind noțiunea de potențial gravitațional explicată în capitolul IV, putem calcula cu ușurință viteza cu care un obiect trebuie să fie aruncat în sus de pe suprafața Pămîntului pentru ca să nu se mai întoarcă niciodată. Am văzut că lucrul mecanic ce urmează a fi consumat pentru a ridica o masă m de la suprafața Pămîntului pînă la distanța R de la centrul acestuia este egal cu:

$$GMm\left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R}\right),$$

în care G este constanta gravitațională, M masa Pămîntului, m masa obiectului, iar R_0 raza Pămîntului. Dacă obiectul urmează să treacă dincolo de punctul de întoarcere, trebuie să punem $R = \infty$ (infinit), $\frac{1}{R} = 0$. Așadar, lucrul mecanic în acest caz devine egal cu

$$\frac{GMm}{R_0}.$$

De pe altă parte, energia cinetică a unui obiect de masă m, care se mișcă cu viteza v, este

$$\frac{1}{2} mv^2.$$

Așadar, pentru a-i comunica o cantitate de energie suficientă pentru a învinge forțele gravitației terestre, trebuie să fie satisfăcută condiția:

$$\frac{1}{2} mv^2 \geqslant \frac{GMm}{R_0},$$

în care simbolul $\geqslant$ înseamnă „egal cu sau mai mare decît". Întrucît m se simplifică în ambii membri ai ecuației, conchidem că: *pentru ca un obiect să iasă din sfera de acțiune a gravitației Pămîntului, e necesară aceeași viteză, indiferent dacă e vorba de un obiect ușor sau de unul greu..*

Din ecuația de mai sus obținem:

$$v \geqslant \sqrt{\frac{2GM}{R_0}}$$

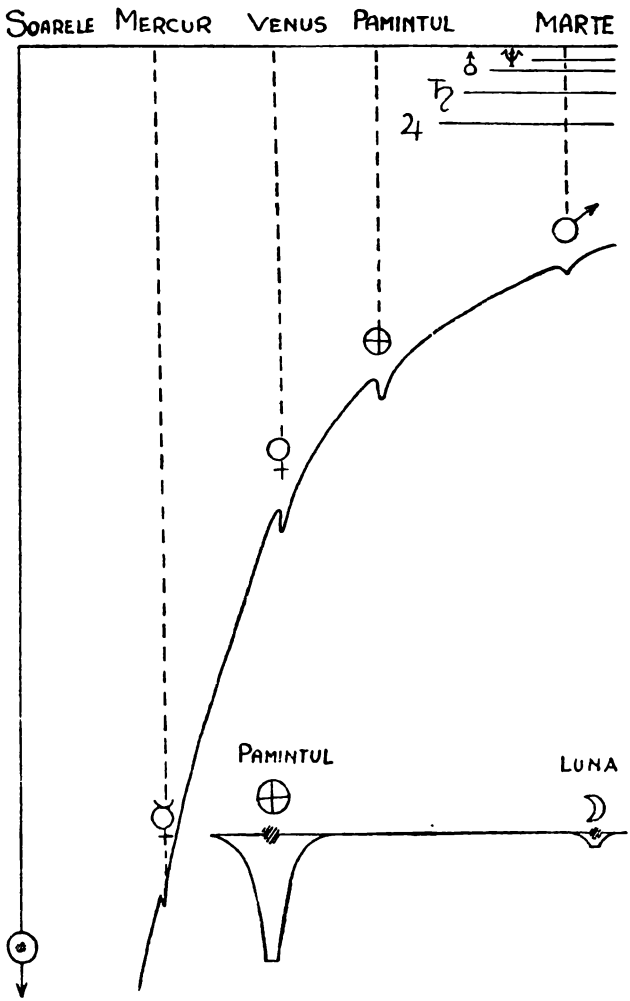
și, punînd $R_0 = 6{,}37 \cdot 10^8$ cm, $M = 6{,}97 \cdot 10^{27}$ g și $G = 6{,}66 \cdot 10^{-8}$, găsim pentru viteză valoarea de 11,2 km/s. Aceasta este așa-numita *viteză de eliberare*[1], adică viteza minimă la care obiectul nu va cădea înapoi pe Pămînt.

Situația e complicată, desigur, de prezența atmosferei Pămîntului. Dacă s-ar fi tras un proiectil de artilerie cu viteza de scăpare necesară de pe suprafața Pămîntului, așa cum se descrie în *O călătorie de la Pămînt la Lună*, romanul științifico-fantastic al scriitorului francez Jules Verne, proiectilul n-ar fi ajuns niciodată la țintă. Contrar descrierii lui Jules Verne, un astfel de proiectil s-ar

[1] Numită și „prima viteză cosmică". — *N. T.*

fi topit imediat din cauza căldurii dezvoltate prin frecare cu aerul, iar resturile lui ar fi căzut pe Pămînt, după ce ar fi pierdut toată energia inițială. Aici se vădește superioritatea rachetei față de un obuz de artilerie. Racheta pornește de pe rampa de lansare foarte încet și-și mărește viteza treptat, pe măsură ce înaintează. Așadar, ea trece prin straturile dense ale atmosferei terestre cu viteze la care încălzirea datorită frecării încă nu este importantă și atinge viteza maximă la înălțimi la care aerul este prea rarefiat pentru a opune vreo rezistență sensibilă zborului. Desigur că frecarea cu aerul la începutul zborului implică oarecare pierderi de energie, dar aceste pierderi sînt relativ mici.

Acum putem examina ce se întîmplă cînd o rachetă, după ce a străbătut atmosfera terestră și și-a consumat tot combustibilul de propulsie, își începe călătoria în spațiu. În fig. 20 se dă o reprezentare grafică a potențialului gravitațional în regiunea planetelor interioare ale sistemului solar (Mercur, Venus, Pămînt și Marte). Panta principală a curbei care se datorește atracției gravitaționale a Soarelui, este dată de GM_s/r, în care M_s este masa Soarelui, iar r este distanța de la rachetă pînă la el. Peste această pantă generală se suprapun „gropi gravitaționale" locale, cauzate de atracția diferitelor planete. Adîncimile „gropilor" sînt indicate la scară corectă, dar lățimile lor sînt mult exagerate, pentru a nu apărea pe desen ca niște linii verticale. În colțul de jos din dreapta al diagramei se reprezintă (la scară mult mai mare) distribuția potențialului gravitațional în spațiul dintre Pămînt și Lună. Deoarece distanța de la Pămînt la Lună este mult mai mică decît distanța de la Pămînt la Soare, variația potențialului gravitațional solar în această regiune este practic insensibilă. Așadar, pentru a trimite o rachetă pe Lună, e suficient ca racheta să învingă gravitația terestră



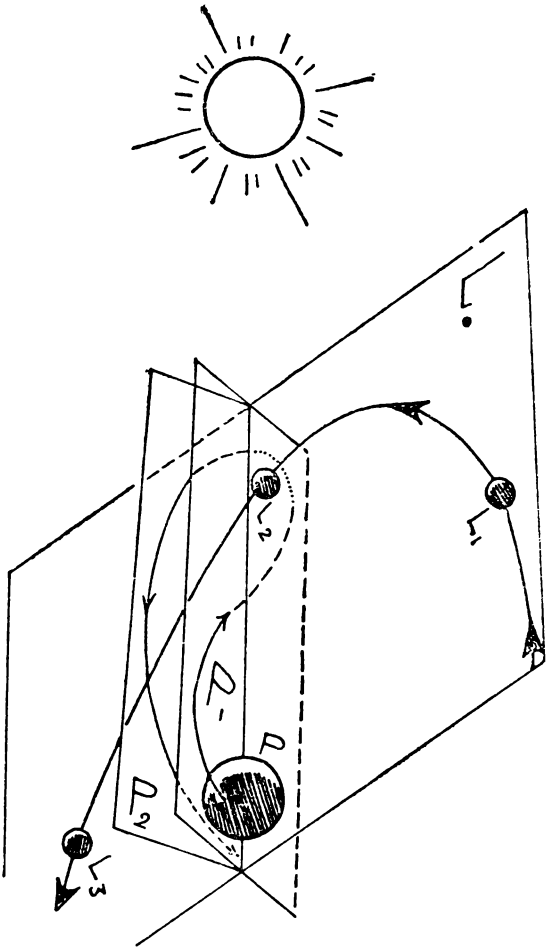
20. Panta potențialului gravitațional în vecinătatea Soarelui. Jos, în dreapta, potențialul gravitațional Pământ-Lună.

și să-i rămînă o viteză suficientă ca să poată parcurge distanța într-un timp rezonabil. În octombrie 1959, specialiștii sovietici în tehnica rachetelor au înfăptuit această realizare și au reușit să fotografieze fața opusă a Lunii. În fig. 21 se dă traiectoria rachetei „Lunik" care reprezintă drumul ei pînă la Lună și înapoi.

Rachetele lansate spre alte planete ale sistemului solar vor avea de învins nu numai atracția gravitațională a Pămîntului, ci și atracția exercitată de Soare. Cînd o rachetă scapă de gravitația Pămîntului cu o mică viteză reziduală, ea va trebui să se miște la mică distanță de-a lungul orbitei Pămîntului, fără să se apropie sau să se depărteze de Soare. Pentru a se depărta de orbita Pămîntului, racheta trebuie să aibă o viteză suficientă pentru a urca panta curbei gravitației solare. După cum se poate vedea din fig. 20, înălțimea la care trebuie să se urce pentru a ajunge la orbita lui Marte este de circa 6,5 ori mai mare decît adîncimea gropii gravitaționale a Pămîntului. Întrucît energia cinetică crește cu pătratul vitezei, o astfel de rachetă trebuie să aibă cel puțin viteza de

$$11{,}2 \cdot \sqrt{6{,}5} = 28 \text{ km/s}.$$

De ce să nu alegem o cale mai ușoară; să ne coborîm la Venus, în loc de a ne urca la Marte? Ironie a sorții! Pentru proiectilele balistice este tot atît de greu să coboare pantele ca și să le urce. Explicația este că racheta, după ce scapă de gravitația Pămîntului, rămîne legată de orbita acestuia. Dacă racheta trebuie să se depărteze de Soare, trebuie să se mărească considerabil viteza ei, ceea ce ar necesita mari cantități suplimentare de combustibil. Dar ca să se apropie de Soare nu este mult mai ușor. Întrucît o rachetă care evoluează prin spațiul lipsit de aer nu poate frîna pentru a-și reduce viteza, cum ar face un automobil, viteza ei poate fi micșorată numai



21. Traiectoria primei rachete care a zburat în jurul Lunii.

dacă racheta ejectează un jet puternic de gaze prin partea din față, ceea ce ar necesita cam aceeași cantitate de combustibil ca atunci cînd își mărește viteza ejectînd gaze pe la partea posterioară. Dat fiind însă că orbita lui

Venus este mai apropiată de orbita Pămîntului decît aceea a lui Marte, diferența de potențial gravitațional este numai de cinci ori mai mare decît groapa gravitațională a Pămîntului, așa că sarcina este proporțional mai ușoară. De fapt, la 12 februarie 1961, specialiștii sovietici au trimis o rachetă spre Venus, care însă nu s-a mai întors.

Toate rachetele trimise pînă acum în spațiu au fost propulsate cu ajutorul combustibilului chimic obișnuit și se bazau pe principiul treptelor multiple ilustrat în fig. 22, *a*. Mai multe rachete de dimensiuni din ce în ce mai mici sînt aranjate una deasupra celeilalte, iar călătoria începe prin aprinderea motoarelor primei trepte, adică a rachetei celei mai mari de la partea de jos. Cînd acest stîlp totemic[1] modern atinge viteza maximă în sus, iar rezervoarele de combustibil ale primei trepte sînt goale, ea se separă de rest și pornesc motoarele treptei a doua a rachetei. Acest proces continuă pînă ce ultima treaptă, care conține instrumentele, șoareci, maimuțe sau oameni, va fi accelerată, în sfîrșit, pînă la viteza necesară.

Altă posibilitate, care în prezent se găsește în studiu intens, este folosirea energiei nucleare. Trebuie să se aibă în vedere că propulsia navelor cosmice prezintă probleme cu totul diferite de acelea ale propulsiei navelor maritime sau aeriene. Pentru acestea din urmă, singurul lucru necesar este energia, deoarece aceste nave înaintează prin împingerea pe care o exercită asupra mediului ambiant, fie că e vorba de apă sau de aer. Dar vidul nu oferă nici un punct de sprijin pentru împingere, așa că navele cosmice sînt propulsate prin ejectarea prin niște ajutaje a unui material pe care-l transportă aceste nave. La rachetele obișnuite cu combustibil chimic avem o si-

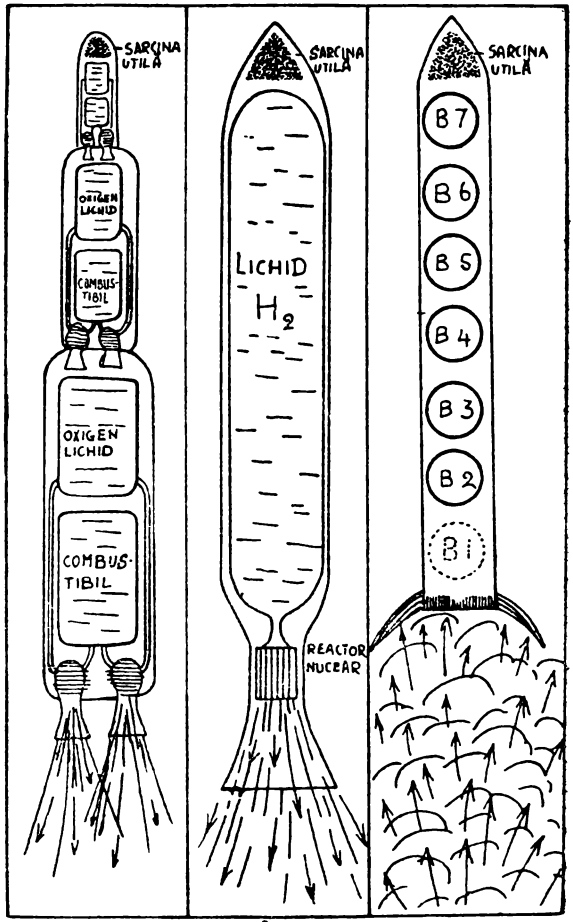
---

[1] Autorul compară racheta cu un stîlp sculptat cu simboluri totemice de unele triburi de indieni din nord-vestul Americii de Nord. — *N. T.*

tuație prezentînd două aspecte. Energia este produsă de reacția chimică dintre carburant (combustibil) și comburant (oxidant), care sînt transportate în două rezervoare separate, iar produsele acestei reacții servesc ca material ejectat prin ajutaj.

Avantajul folosirii ca material ejectat a produselor procesului producerii de energie este contrabalansat însă de faptul că produsele de ardere (în majoritate bioxid de carbon și vapori de apă) constau din molecule relativ grele. Teoria vehiculelor cu reacție arată că împingerea descrește pe măsură ce greutatea moleculelor care alcătuiesc jetul crește. Prin urmare, ar fi avantajos să se folosească un jet format din elementul chimic cel mai ușor, hidrogenul. Hidrogenul fiind însă un element (corp simplu), nu poate fi produs ca rezultat al nici unui fel de arderi. Ceea ce s-ar putea face, ar fi să se transporte hidrogen lichid într-un singur rezervor și să se încălzească acest hidrogen la temperatură foarte înaltă cu ajutorul unui reactor nuclear. Un desen schematic al unei asemenea rachete nucleare este dat în fig. 22, *b*.

Alt proiect promițător de utilizare a energiei nucleare la propulsia rachetelor, propus inițial de dr. Stanislaw Ulam, de la Laboratorul științific de la Los Alamos, este reprezentat în fig. 22, *c*. Corpul rachetei este umplut cu un mare număr de particule atomice, care sînt ejectate una cîte una prin orificiul din partea posterioară și explodează la oarecare distanță în spatele rachetei. Gazele rezultate din aceste explozii avînd viteze mari ar ajunge racheta din urmă și ar exercita o presiune asupra unui disc mare atașat la partea posterioară a rachetei. Impulsurile succesive ar accelera racheta pînă ce aceasta ar atinge viteza dorită. Studiile preliminare asupra unei astfel de metode de propulsie arată că ea ar putea fi superioară modelului cu hidrogen încălzit de reactor.



22. *a* — rachetă cu combustibil chimic cu mai multe trepte; *b* — rachetă nucleară convențională; *c* — rachetă nucleară neconvențională.

Într-o carte de popularizare ca aceasta este greu să se descrie toate posibilitățile care mijesc la orizontul progresului zborurilor cosmice, așa încît încheiem acest

capitol accentuînd un punct important. Cînd se trimit nave cosmice în punctele îndepărtate ale sistemului nostru solar (și, poate, chiar dincolo de el) se pun două probleme cu totul diferite: prima, cum se poate scăpa de atracția gravitațională a Pămîntului? a doua, după ce nava a scăpat de această atracție, cum poate căpăta viteză suficientă pentru a ajunge la destinație? Pînă acum, toate încercările în această direcție s-au limitat la a imprima rachetei o viteză inițială suficientă pentru a scăpa de gravitația terestră cu o viteză reziduală suficientă pentru a se îndrepta spre destinația dată. Aceste două obiective pot fi însă separate și se pot folosi metode diferite de propulsie pentru prima și a doua etapă.

Pentru ca racheta să se desprindă de suprafața Pămîntului, e necesară o acțiune violentă, deoarece, dacă împingerea motoarelor rachetei nu e suficient de mare, racheta va sforăi și va pufăi, dar nu se va ridica de pe rampa de lansare. În acest caz sînt necesare metode energice de propulsie chimică sau nucleară. O dată, însă, ce nava cosmică a fost ridicată și plasată pe o orbită de satelit în jurul Pămîntului, situația devine cu totul diferită. Acum avem timp suficient pentru a accelera nava cosmică și putem utiliza metode de propulsie mai puțin violente și mai economice. Energia poate fi tot chimică sau nucleară sau, la urma urmei, energia furnizată de razele Soarelui, dar n-avem nici o grabă și nu sîntem în pericol de a cădea pe Pămînt. O navă cosmică plasată pe orbită în jurul globului nostru poate să-și accelereze zborul pe îndelete, mișcîndu-se pe o traiectorie spirală care se lărgește încet și în cele din urmă să capete suficientă energie pentru a-și îndeplini misiunea. E foarte probabil că combinarea acțiunii violente la pornire cu o navigație mai domoală în restul călătoriei va fi soluția viitoare a problemei călătoriilor cosmice.

TEORIA GRAVITAȚIEI ELABORATĂ DE EINSTEIN[1]

Succesul enorm al teoriei lui Newton în ce privește descrierea mișcării corpurilor cerești pînă în cele mai mici amănunte a caracterizat o epocă memorabilă în istoria fizicii și a astronomiei. Totuși, *natura* interacțiunii gravitaționale și, în particular, cauzele pentru care masa gravitațională și cea inerțială sînt proporționale, ceea ce face ca toate corpurile să cadă cu aceeași accelerație, a rămas în complet întuneric pînă ce Albert Einstein a publicat în 1914 un articol asupra acestui subiect. Cu zece ani mai înainte, Einstein formulase „teoria relativității restrînse", în care postula că nici o observație făcută în interiorul unei încăperi închise, chiar dacă aceasta ar reprezenta cel mai complet laborator de fizică, nu va putea da răspuns la întrebarea dacă încăperea stă pe loc sau se mișcă în linie dreaptă cu viteză constantă. Pe această bază, Einstein a respins ideea mișcării uniforme absolute, a înlăturat noțiunea veche și contradictorie a „eterului universal" și a elaborat teoria relativității, care a revoluționat fizica. Într-adevăr, nici o măsurătoare mecanică, optică sau de altă natură, care s-ar putea face într-o cabină din interiorul unui vapor navigînd pe o mare liniștită (acest capitol a fost scris chiar într-o cabină interioară a transatlanticului „Queen Elisabeth")

[1] Conținutul acestui capitol și al capitolului X urmează îndeaproape articolul autorului, intitulat *Gravitația*, apărut în numărul din martie 1961 al revistei „Scientific American".

sau într-un avion zburînd cu perdelele lăsate prin aerul calm n-ar putea da vreo informaţie în legătură cu faptul că vaporul se află pe apă sau într-un doc uscat, ori că avionul este în zbor sau se află pe aeroport. Dacă însă marea este agitată sau aerul e perturbat de curenţi, ori dacă vaporul se izbeşte de un aisberg sau aeroplanul se loveşte de vîrful unui munte, situaţia devine cu totul diferită; orice abatere de la mişcarea uniformă se va resimţi în mod penibil.

Pentru a studia această problemă, Einstein şi-a imaginat că se găseşte în situaţia unui cosmonaut modern şi a examinat care ar fi rezultatele diferitelor experienţe de fizică făcute într-o staţiune cosmică de observaţii, departe de orice mase gravitaţionale (fig. 23). Într-o astfel de staţiune în repaus sau deplasîndu-se cu viteză uniformă în raport cu stelele depărtate, observatorii din interiorul laboratorului şi toate instrumentele nefixate pe pereţii cabinei ar pluti liber în interiorul acesteia. Nu ar exista nici „sus" nici „jos". Îndată însă ce s-ar porni motoarele rachetei şi s-ar accelera înaintarea cabinei într-o anumită direcţie s-ar observa fenomene foarte asemănătoare cu gravitaţia. Instrumentele şi oamenii ar fi apăsaţi pe peretele vecin cu motoarele rachetei. Acest perete ar deveni „podea", iar peretele opus, „plafon". Oamenii s-ar putea ridica în picioare şi ar putea sta tot astfel cum stau pe Pămînt. Dacă, în plus, acceleraţia navei cosmice ar fi făcută egală cu acceleraţia gravitaţiei la suprafaţa Pămîntului, oamenii dinăuntrul ei ar avea impresia că nava se găseşte încă pe rampa de lansare.

Să presupunem că pentru a studia proprietăţile acestei „pseudogravitaţii", un observator care se găseşte într-o rachetă accelerată ar da drumul simultan la două sfere. una de fier şi alta de lemn. Ceea ce s-ar întîmpla „efectiv" se poate descrie în cuvintele următoare: în timpul

23. Albert Einstein într-o rachetă imaginară (*gedanken-experimental*).

cînd observatorul ţine în mîini cele două sfere, acestea se mişcă cu mişcare accelerată, împreună cu racheta propulsată de motoare. Îndată însă ce se dă drumul sferelor, rupîndu-se în acest mod legătura cu corpul rachetei, asupra lor nu mai acţionează nici o forţă motoare, iar

sferele se vor deplasa una alături de alta cu o viteză egală cu aceea pe care o avea nava cosmică în momentul cînd li s-a dat drumul din mîini. Racheta va continua însă să-şi mărească viteza, iar „podeaua" laboratorului cosmic va ajunge repede din urmă cele două sfere şi le va „lovi" simultan. Pentru observatorul care a dat drumul celor două sfere, fenomenul va părea că se desfăşoară cu totul altfel. El va vedea sferele căzînd şi „lovind podeaua" în acelaşi moment. El îşi va aminti de demonstraţia făcută de Galilei din turnul din Pisa şi va deveni şi mai convins că există, într-adevăr un cîmp gravitaţional în laboratorul său cosmic.

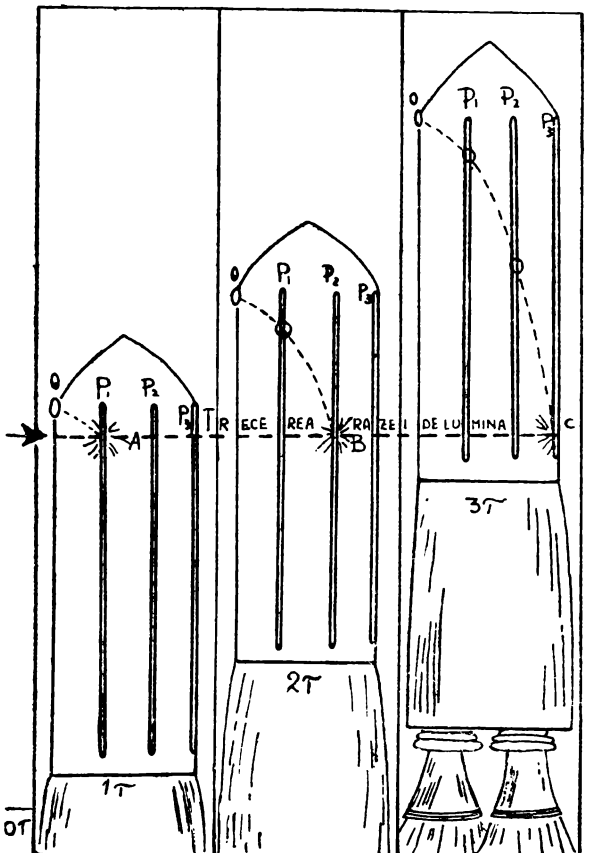
Ambele descrieri ale modului cum se vor comporta sferele sînt la fel de corecte, aşa că Einstein a înglobat echivalenţa celor două puncte de vedere în baza noii sale teorii relativiste a gravitaţiei. Acest aşa-numit *principiu al echivalenţei* între observaţiile efectuate în interiorul unei cabine accelerate şi într-un cîmp „real" de gravitaţie ar fi însă de minimă importanţă dacă s-ar aplica numai la fenomenele mecanice. Ideea lui Einstein era că această echivalenţă este cu totul generală şi este valabilă şi în cazul fenomenelor optice şi al tuturor fenomenelor electromagnetice.

Să examinăm ce se întîmplă cu o rază de lumină care se propagă străbătînd cabina noastră cosmică de la un perete la altul. Putem observa traiectoria luminii dacă punem o serie de plăci fluorescente de sticlă în calea ei sau dacă suflăm pur şi simplu fum de ţigară pe traiectorie. În fig. 24 se arată ce se întîmplă în realitate cînd o rază trece prin mai multe plăci de sticlă aşezate la distanţe egale între ele. În *A*, lumina cade pe porţiunea superioară a primei plăci, producînd un punct fluorescent. În *B*, cînd lumina cade pe a doua placă, produce fluorescenţă mai aproape de mijlocul plăcii. În *C*, lumina

cade pe placă și mai jos. Mișcarea rachetei fiind accelerată, distanța parcursă în al doilea interval de timp este de trei ori mai mare decît în primul și deci cele trei puncte fluorescente nu se vor găsi pe o linie dreaptă, ci pe o traiectorie (parabolă) care se curbează în jos. Observatorul din interiorul cabinei, considerînd toate fenomenele pe care le observă ca fiind datorite gravitației, va trage din experiența sa concluzia că *raza de lumină se curbează în timp ce se propagă printr-un cîmp gravitațional.* Așadar, a conchis Einstein, dacă principiul echivalenței este un principiu general al fizicii, razele de lumină care vin de la stelele depărtate ar trebui să se încovoaie cînd trec în apropierea Soarelui în drumul lor spre un observator terestru. Concluzia sa a fost confirmată în mod strălucit în timpul eclipsei din anul 1919, cînd o expediție astronomică britanică în Africa a observat deplasarea pozițiilor aparente ale stelelor din apropierea Soarelui eclipsat. În modul acesta, echivalența cîmpului gravitațional și a sistemelor accelerate a devenit un fapt indiscutabil al fizicii.

În cele ce urmează ne vom ocupa de alt tip de mișcare accelerată și de legătura ei cu cîmpul gravitațional. Pînă acum am examinat cazul în care viteza variază ca valoare numerică, dar nu și ca direcție. Mai există și tipul de mișcare în care viteza își modifică direcția, dar nu și valoarea numerică; aceasta este mișcarea de rotație. Închipuiți-vă niște căluși (fig. 25) cu o perdea atîrnată de jur împrejur, așa încît persoanele dinăuntru să nu-și poată da seama, privind la obiectele dimprejur, că platforma se rotește. După cum știe oricine, o persoană stînd în picioare pe o platformă în rotație este supusă forței centrifuge, care o împinge spre marginea platformei, iar o minge pusă pe platformă se va rostogoli, depărtîndu-se de centru. Forța centrifugă care acționează asupra unui obiect

pus pe platformă este proporțională cu masa lui, așa încît putem iarăși considera lucrurile ca fiind echivalente cu un cîmp gravitațional. Dar acesta este un cîmp

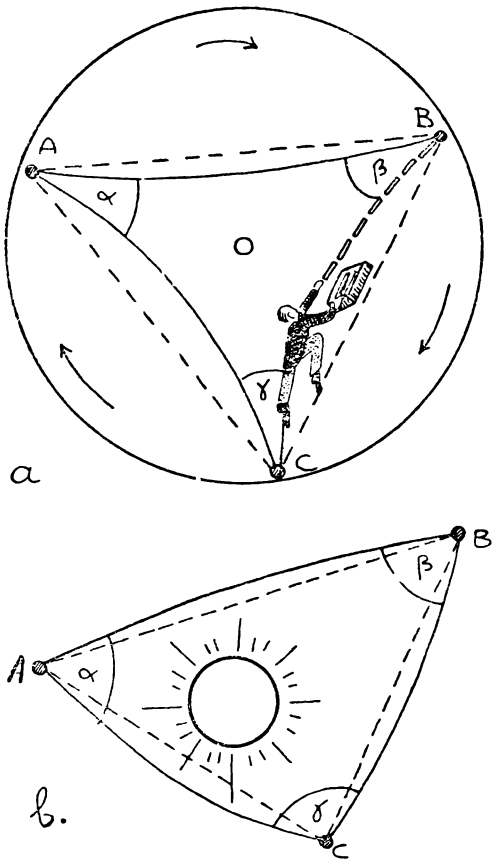


24. Propagarea luminii într-o rachetă accelerată.

gravitațional foarte ciudat și oarecum diferit de cîmpurile care înconjură Pămîntul sau Soarele.

În primul rînd, în loc de a reprezenta atracția, care descrește cu pătratul distanței de la centru, el corespunde

unei respingeri care crește proporțional cu această distanță. În al doilea rînd, în loc să fie sferic simetric în jurul masei centrale, el are o simetrie cilindrică în jurul



25. *a* — cîteva experiențe pe o platformă în rotație; *b* — triangulație în jurul Soarelui.

axei centrale, care coincide cu axa de rotație a platformei. Dar principiul echivalenței stabilit de Einstein se aplică

și aici, iar acele forțe pot fi interpretate ca fiind datorate unor mase gravitaționale distribuite la distanțe mari de jur împrejurul axei de simetrie.

Evenimentele fizice care au loc pe o astfel de platformă în rotație pot fi interpretate pe baza teoriei relativității restrînse a lui Einstein, potrivit căreia lungimea riglelor de măsurat și mersul ceasornicelor sînt influențate de mișcarea lor. Într-adevăr, cele două concluzii fundamentale ale acestei teorii sînt:

1. Dacă observăm un obiect ce trece pe lîngă noi cu o anumită viteză v, el va părea contractat în direcția mișcării cu un factor

$$\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}},$$

în care c este viteza luminii. Pentru vitezele obișnuite, care sînt foarte mici în raport cu viteza luminii, acest factor este practic egal cu 1 și nu se va observa nici o contracție sensibilă. Cînd însă v se apropie de c, efectul devine apreciabil.

2. Dacă un ceasornic aflat în mișcare trece prin fața noastră cu viteza v, el va părea că rămîne în urmă, iar mersul său va fi încetinit cu un factor

$$\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Ca și în cazul contracției lungimilor, acest efect se poate observa numai cînd viteza v se apropie de viteza luminii.

Avînd în vedere aceste două efecte, să considerăm rezultatele diferitelor observații care pot fi făcute pe o platformă în rotație. Să presupunem că vrem să găsim legile propagării luminii între diferite puncte de pe platformă. Alegem două puncte, A și B, la periferia discului

care se rotește (fig. 25, *a*), unul servind drept sursă, iar celălalt ca receptor de lumină. Conform legii fundamentale a opticii, lumina se propagă întotdeauna pe drumul cel mai scurt. Care este drumul cel mai scurt dintre punctele *A* și *B* de pe platforma în rotație? Pentru a măsura lungimea unei linii oarecare care unește pe *A* cu *B*, ne vom servi în cazul de față de o metodă veche, dar sigură, constînd în a număra cîte rigle gradate pot fi puse cap la cap de-a lungul liniei dintre *A* și *B*. Dacă discul nu se rotește, situația este evidentă și cea mai scurtă distanță dintre *A* și *B* este linia dreaptă cunoscută din vechea și familiara geometrie euclidiană. Dacă însă discul se rotește, riglele gradate puse de-a lungul liniei *AB* se mișcă cu o anumită viteză și, prin urmare, e de așteptat ca lungimea lor să sufere o contracție relativistă. Atunci va fi necesar un număr mai mare de rigle pentru a acoperi acea distanță.

Se ivește însă o situație interesantă. Dacă mutăm o riglă mai aproape de centru, viteza liniară a ei se micșorează și nu se mai contractă așa de mult ca atunci cînd era mai depărtată de centru. Așadar, încovoind linia formată din rigle spre centru, vom avea nevoie de un număr mai mic de rigle, deoarece, deși distanța „reală" este ceva mai lungă, acest dezavantaj va fi compensat cu prisosință de contractarea mai mică a fiecărei rigle. Dacă înlocuim riglele cu unde luminoase, ajungem la concluzia că și raza de lumină se va încovoia în direcția cîmpului gravitațional, care în cazul de față este dirijat de la centru spre periferie.

Înainte de a părăsi platforma noastră de călușei, să mai facem o experiență. Să luăm două ceasornice identice, să punem unul din ele în centrul platformei, iar pe celălalt la periferia ei. Deoarece primul ceasornic se găsește în stare de repaus, pe cînd cel de-al doilea se mișcă

cu o anumită viteză, al doilea va rămîne în urmă față de primul. Interpretînd forța centrifugă ca forță de gravitație, vom spune că ceasornicul pus în potențialul gravitațional mai mare (adică în direcția în care acționează forța gravitațională) va merge mai încet.

Această încetinire o întîlnim la toate fenomenele fizice, chimice și biologice. O dactilografă lucrînd la primul etaj al clădirii „Empire State"[1] va îmbătrîni mai încet decît sora sa geamănă care lucrează la ultimul etaj. Diferența va fi însă foarte mică; se poate calcula că în zece ani domnișoara de la etajul întîi va fi cu cîteva milionimi de secundă mai tînără decît colega ei de la ultimul etaj.

Cînd e vorba de diferența de gravitație dintre suprafața Pămîntului și suprafața Soarelui, efectul este mult mai mare. Un ceasornic pus pe suprafața Soarelui va rămîne în urmă cu a zecea mia parte din 1% în raport cu ceasornicul terestru. Desigur, nimeni nu poate pune un ceasornic pe suprafața Soarelui și nu-l poate privi mergînd, dar rămînerea în urmă presupusă a fost confirmată observîndu-se frecvențele liniilor spectrale emise de atomii din atmosfera Soarelui.

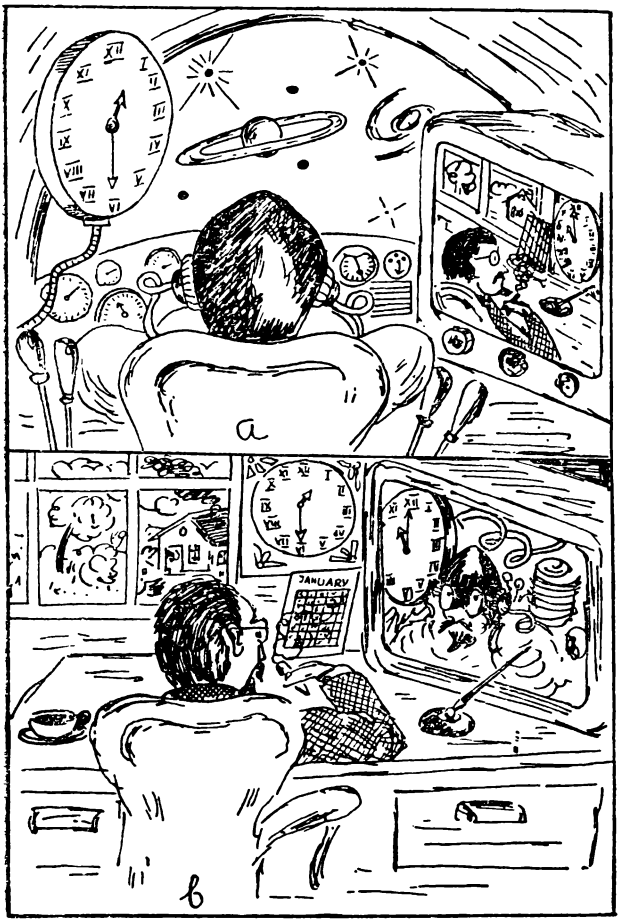
Problema îmbătrînirii cu viteze diferite a celor două surori gemene datorată faptului că lucrează în locuri cu potențiale gravitaționale diferite este asemănătoare cu problema unor frați gemeni, dintre care unul stă acasă, iar celălalt călătorește foarte mult. Să ne închipuim că unul din frați este pilot-cosmonaut, iar celălalt funcționar la un cosmodrom, situat undeva pe suprafața Pămîntului. Cosmonautul pleacă într-o misiune spre o stea depărtată oarecare, pilotînd nava sa cosmică cu o viteză apropiată de viteza luminii, pe cînd fratele său își continuă

[1] Cea mai înaltă clădire din lume, cu 104 de etaje, situată în New York. — *N. T.*

activitatea la biroul de pe cosmodrom. După teoria lui Einstein, fiecare frate îmbătrînește mai încet decît celălalt. Astfel, cînd fratele cosmonaut se întoarce pe Pămînt, e de așteptat să găsească că fratele său, funcționarul, a îmbătrînit mai puțin decît el însuși; dar, fratele său, funcționarul, va ajunge la o concluzie exact contrară. Acest lucru pare absurd, deoarece, de exemplu, dacă cineva apreciază vîrsta după încărunțirea părului, cei doi frați ar putea afla care din ei a îmbătrînit mai mult pur și simplu stînd unul lîngă altul în fața unei oglinzi.

Soluția acestui presupus paradox este că afirmația privitoare la îmbătrînirea relativă a fraților gemeni este corectă *numai* în cadrul așa-numitei „teorii a relativității restrînse", care are în vedere numai mișcarea uniformă cu viteză constantă. În acest caz fratele cosmonaut cu siguranță că nu se va mai întoarce niciodată și, prin urmare, nu va putea sta alături de fratele său în fața oglinzii, pentru a-și compara părul încărunțit. Lucrul cel mai bun pe care-l pot face frații e să-și procure două aparate de televiziune: unul să fie situat în biroul de pe cosmodrom, arătîndu-l pe cosmonaut și ceasornicul său în cabina navei cosmice, iar celălalt în nava cosmică, arătînd pe fratele din birou avînd ceasornicul situat deasupra capului (fig. 26).

Dr. Eugene Feenberg de la Universitatea din Washington a studiat această situație teoretic, pe baza binecunoscutei legi a propagării semnalelor de radio. Concluzia sa a fost că. privind ecranele de televiziune, *fiecare* frate va observa, într-adevăr, că celălalt îmbătrînește mai încet. Dacă însă fratele cosmonaut urmează să se întoarcă pe Pămînt, el trebuie mai întîi să micșoreze viteza navei cosmice, să o oprească complet și să o accelereze în direcția spre casă. Această necesitate pune pe cei doi frați în situații cu totul diferite. După cum am văzut mai înainte, accele-



26. Îmbătrînirea relativă a unor fraţi gemeni, observată la aparatele de televiziune.

rarea şi reducerea vitezei sînt echivalente cu un cîmp gravitaţional care face să se încetinească mersul ceasornicului, precum şi desfăşurarea tuturor celorlalte fenomene. Aşadar, după cum o dactilografă care lucrează la

primul etaj al clădirii „Empire State" va îmbătrîni mai încet decît sora ei geamănă care lucrează la ultimul etaj, tot așa și fratele cosmonaut va îmbătrîni mai încet decît fratele său de pe Pămînt. Prin urmare, dacă zborul cosmic este mai îndelungat, la întoarcerea sa pe Pămînt cosmonautul își vă răsuci mîndru mustața neagră, uitîndu-se mirat la chelia strălucitoare a fratelui său geamăn. Așadar, nu e vorba aici de nici un paradox.

O experiență interesantă, concepută pentru a confirma încetinirea timpului datorită gravitației (dacă mai e necesară încă o confirmare) a fost propusă de S. F. Singer, de la Universitatea Statului Maryland, care a lansat ideea de a se plasa un ceasornic atomic în sateliții care se rotesc pe orbite circulare la diferite înălțimi deasupra suprafeței Pămîntului. S-a calculat că pentru un satelit călătorind la înălțimi mai mici decît raza globului pămîntesc principalul efect relativist va fi acela de a face să rămînă în urmă ceasornicul din cauza vitezei sale și va fi dat de factorul de dilatație a timpului $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$. Pentru altitudini mai mari, efectul vitezei va deveni, probabil, de mai mică importanță și, în loc de a rămîne în urmă, ceasornicul o va lua înainte, deoarece se găsește într-un cîmp gravitațional mai slab (cum ar fi domnișoara de la ultimul etaj al clădirii „Empire State"). Nu există nici o îndoială că această experiență interesantă va confirma teoria lui Einstein.

Această analiză ne duce la concluzia că lumina, propagîndu-se printr-un cîmp gravitațional, nu urmează o linie dreaptă, ci se curbează în direcția cîmpului și că, datorită contracției riglelor gradate, distanța cea mai scurtă dintre două puncte nu este o linie dreaptă, ci o

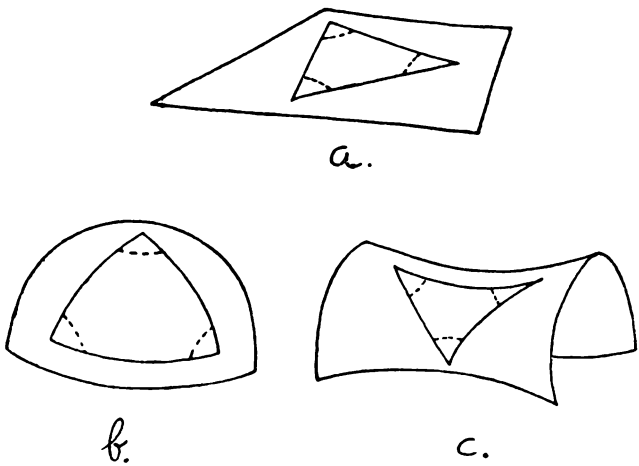
curbă care de asemenea se încovoaie în direcţia cîmpului gravitaţional. Dar ce altă definiţie se poate da unei „linii drepte" decît că este drumul urmat de lumină în vid sau distanţa cea mai scurtă dintre două puncte?

Ideea lui Einstein era că ar trebui să se păstreze vechea definiţie a „liniei drepte" în cazul cîmpului gravitaţional, dar în loc de a spune că razele de lumină şi distanţele cele mai scurte sînt curbe, să se spună că însuşi spaţiul este curb. E greu de conceput ideea unui spaţiu curb cu trei dimensiuni, şi cu atît mai mult aceea a unui spaţiu curb cu patru dimensiuni, în care timpul joacă rolul de a patra coordonată. Cel mai bun mijloc este de a face uz de o analogie cu suprafeţele cu două dimensiuni, pe care le putem uşor reprezenta. Ne este tuturor familiară geometria plană a lui Euclid, care se ocupă cu diferitele figuri pe care le putem trasa pe o suprafaţă sau un plan. Dacă însă în loc de a le trasa pe un plan, trasăm figuri geometrice pe o suprafaţă curbă, cum ar fi suprafaţa unei sfere, teoremele lui Euclid nu mai sînt valabile. Acest lucru se demonstrează în fig. 27, care reprezintă triunghiuri desenate pe un plan (*a*), pe o suprafaţă sferică (*b*) şi pe o suprafaţă care (pentru motive evidente) se numeşte suprafaţă de şa (*c*).

La un triunghi plan, suma celor trei unghiuri este întotdeauna egală cu 180°. La un triunghi de pe suprafaţa unei sfere, suma celor trei unghiuri este întotdeauna mai mare de 180°, iar surplusul depinde de raportul dintre mărimea triunghiului şi mărimea sferei. La triunghiurile desenate pe o suprafaţă-şa, suma unghiurilor este mai mică decît 180°. E adevărat că liniile formînd triunghiurile de pe suprafeţele sferice şi în formă de şa nu sînt „drepte" din punctul de vedere al spaţiului cu trei dimensiuni, dar sînt „cele mai drepte", adică cele

mai scurte distanţe dintre două puncte, dacă linia nu trebuie să părăsească suprafaţa respectivă. Pentru a nu se produce confuzii, matematicienii numesc aceste linii *linii geodezice* sau pur şi simplu *geodezice.*

În mod asemănător putem vorbi despre geodezicele sau liniile cele mai scurte din spaţiul cu trei dimensiuni unind două puncte cu linii de-a lungul cărora s-ar propaga ra-



27. Triunghiuri pe o suprafaţă plană (*a*), o sferă (*b*) şi o suprafaţă-şa (*c*).

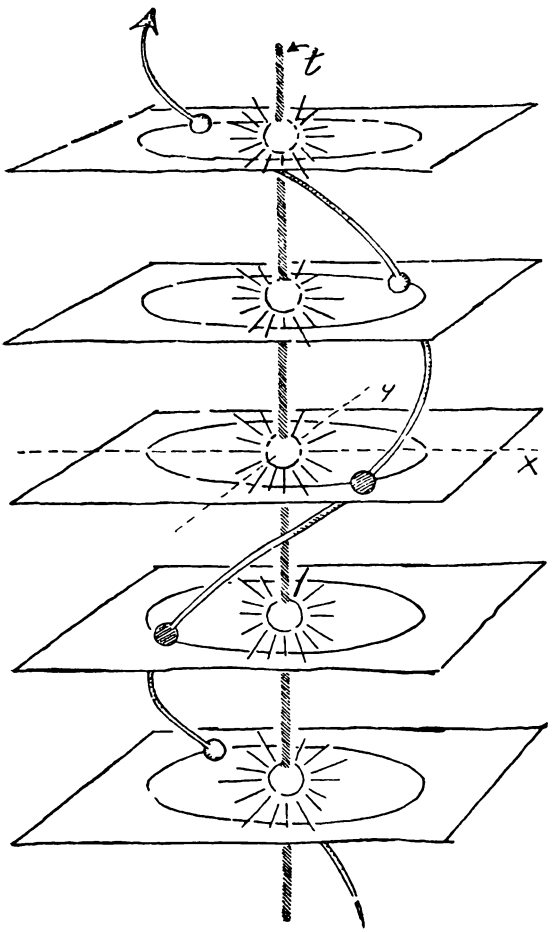
zele de lumină. Măsurînd suma celor trei unghiuri ale unui triunghi în spaţiu, putem spune că spaţiul este plan dacă această sumă este egală cu 180°, sferic sau cu curbură pozitivă, dacă ea este mai mare de 180°, şi în formă de şa sau cu curbură negativă, dacă este mai mică de 180°.

Să ne închipuim trei astronomi, pe Pămînt, pe Venus şi pe Marte, măsurînd unghiurile unui triunghi format de raze de lumină străbătînd spaţiul dintre aceste trei pla-

nete. Întrucît, după cum am văzut, razele de lumină care se propagă prin cîmpul gravitațional al Soarelui se curbează în direcția forței de gravitație, situația se va prezenta așa cum se arată în fig. 25, *b*, iar suma unghiurilor triunghiului va fi mai mare de 180°. În acest caz ar fi rezonabil să se spună că lumina se propagă după distanțele cele mai scurte sau după linii geodezice, dar că spațiul din jurul Soarelui este curbat în sens pozitiv. În mod similar, în cîmpul gravitațional, care este echivalent cu cîmpul forței centrifuge pe un disc în rotație (fig. 25, *a*), suma unghiurilor unui triunghi este mai mică de 180°, iar spațiul trebuie să fie considerat ca curbat în sens negativ.

Raționamentele care preced reprezintă baza teoriei geometrice a gravitației formulate de Einstein. Teoria sa a înlocuit vechiul punct de vedere al lui Newton, conform căruia masele mari, cum este aceea a Soarelui, produc în spațiul înconjurător anumite cîmpuri de forță care fac ca planetele să se miște pe traiectorii curbe în loc de linii drepte. În concepția einsteiniană, spațiul însuși devine curb, pe cînd planetele se mișcă pe liniile „cele mai drepte" — adică geodezice — în acest spațiu curb. Pentru a se evita confuzia, ar trebui să se adauge că aici ne referim la linii geodezice în continuul spațiu-timp cu patru dimensiuni și că ar fi greșit, desigur, să se spună că orbitele însele sînt linii geodezice în spațiul cu trei dimensiuni.

Situația este reprezentată schematic în fig. 28, în care t este axa timpului, iar x și y două axe ale spațiului situate în planul orbitei. Linia șerpuită, cunoscută sub numele de *linia cosmică (sau linia de univers)* a unui obiect în mișcare (în cazul de față, Pămîntul) este linia geode-



28. Linia cosmică pe care se mişcă Pămîntul în continuul spaţiu-timp este reprezentată aici într-un sistem de coordonate în care axa verticală este axa t a timpului, iar x şi y sînt două axe spaţiale.

zică în continuul spațiu-timp[1]. Interpretarea dată de Einstein gravitației, ca curbură a continuului spațiu-timp, conduce la rezultate puțin diferite de prezicerea teoriei clasice newtoniene, permițînd astfel să se facă o verificare experimentală. De exemplu, ea a explicat precesia axei mari a orbitei lui Mercur cu 43 secunde de unghi pe secol și astfel a dezlegat o enigmă veche a mecanicii cerești clasice.

---

[1] De observat că scările orizontale și verticale din fig. 28 sînt date necesarmente în unități diferite. Într-adevăr, în timp ce raza orbitei Pămîntului este de numai 8 min (dacă este exprimată în timpul de propagare a luminii), distanța de la un plan de ianuarie la altul este, desigur, de un an, adică de 60 000 de ori mai mare. Așadar, la scara adevărată, linia geodezică ar devia foarte puțin de la o linie dreaptă.

CAPITOLUL X

PROBLEME DE GRAVITAȚIE NEREZOLVATE

În jurnalul de laborator al lui Michael Faraday (1791—1867), care a adus numeroase contribuții importante la cunoașterea electricității și a magnetismului, se găsește un pasaj interesant datînd din anul 1849. El sună astfel:

„Gravitația. Cu siguranță că această forță trebuie să aibă o legătură, ce poate fi dovedită experimental, cu electricitatea, magnetismul și alte forțe, așa încît ea să se producă cu ajutorul lor, prin acțiunea reciprocă și efect echivalent. Să ne gîndim un moment cum să procedăm pentru a aborda această chestiune servindu-ne de fapte și de încercări".

Dar numeroasele experiențe întreprinse de acest celebru fizician englez în scopul descoperirii unei astfel de legături au fost infructuoase, astfel că el încheie acest capitol al jurnalului său cu următoarele cuvinte:

„Aci se termină încercările mele pentru momentul de față. Rezultatele sînt negative. Ele însă nu-mi zdruncină convingerea puternică că există o legătură între gravitație și electricitate, deși nu aduc nici o dovadă că există o astfel de legătură".

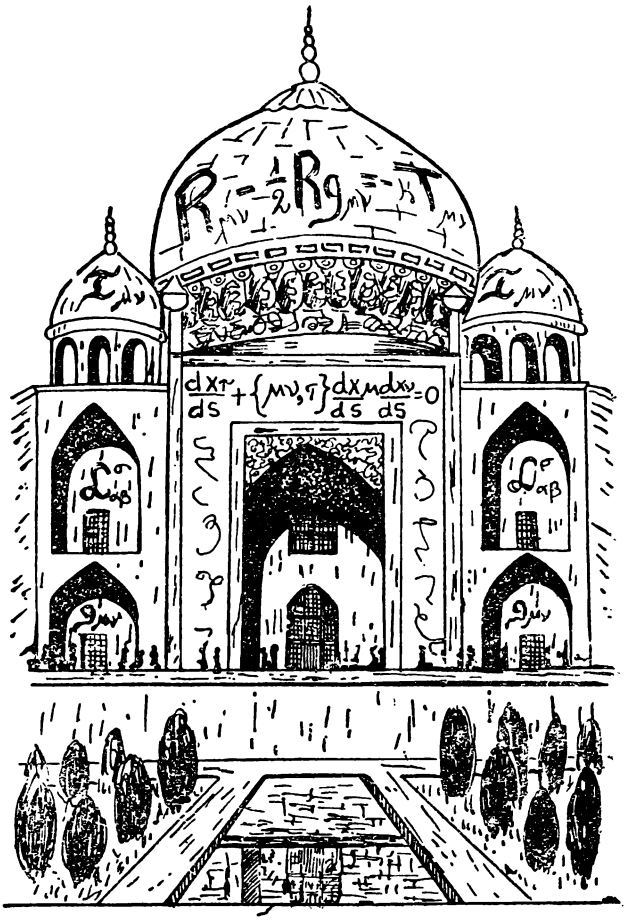
E un lucru foarte ciudat că teoria gravitației, inițiată de Newton și completată de Einstein, se găsește astăzi într-o izolare maiestuoasă, un fel de Taj Mahal[1] (fig. 29) al știin-

[1] Faimos monument indian, construit în afara orașului Agra, în secolul al XVII-lea, de împăratul Șah-Jehan, în memoria soției sale favorite. — *N.T.*

ței, care nu are decît puțin de-a face, sau chiar de loc, cu progresul rapid din alte ramuri ale științei. Concepția lui Einstein despre cîmpul gravitațional s-a născut din teoria relativității restrînse formulată de el, iar această teorie se baza pe teoria *cîmpului electromagnetic* formulată în secolul trecut de fizicianul englez James Clerk Maxwell (1831—1879). Dar, în ciuda numeroaselor încercări, Einstein și cei ce l-au urmat n-au reușit să stabilească vreun contact cu electrodinamica lui Maxwell.

Teoria gravitației formulată de Einstein era mai mult sau mai puțin contemporană cu *teoria cuantelor,* dar în intervalul de timp de 45 de ani de cînd au apărut, cele două teorii s-au dezvoltat în măsură diferită. Propusă de Max Planck și continuată de lucrările lui Niels Bohr, Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg și alții, teoria cuantelor a făcut un progres colosal și a devenit o disciplină largă, care explică amănunțit structura intimă a atomilor și a nucleelor lor. Pe de altă parte, teoria gravitației elaborată de Einstein a rămas pînă astăzi, în esență, ceea ce era cînd el a formulat-o acum o jumătate de secol. În timp ce sute și chiar mii de oameni de știință studiază diferitele ramuri ale teoriei cuantelor și le aplică în foarte multe domenii de cercetări experimentale, numai cîțiva continuă să-și consacre timpul și pasiunea dezvoltării mai departe a studiului gravitației. Oare spațiul gol să fie mai simplu decît corpurile materiale? Sau geniul lui Einstein a realizat tot ce se putea face în domeniul gravitației în timpul nostru și a lipsit o generație întreagă de speranța în noi progrese?

După ce a redus gravitația la proprietățile geometrice ale unui continuu spațiu-timp, Einstein era convins că cîmpul electromagnetic trebuie să aibă și el o oarecare interpretare pur geometrică. *Teoria unitară a cîmpului,* care a rezultat din această convingere, și-a făcut drum cu greu,



29. Templul gravitației (literele de pe templu sînt ecuațiile fundamentale ale teoriei relativiste a gravitației formulată de Einstein).

iar Einstein a murit fără să fi dat în domeniul teoretic ceva atît de simplu, elegant și convingător ca lucrarea sa anterioară. Se pare acum că adevărata legătură dintre forțele gravitaționale și electromagnetice se poate găsi numai prin studierea particulelor elementare, despre care

auzim vorbindu-se așa de mult în ziua de azi, și prin aflarea cauzei pentru care aceste particule speciale, cu masele și sarcinile electrice particulare ale lor, există în natură.

O problemă fundamentală se referă la intensitatea relativă a interacțiunilor gravitaționale și electromagnetice dintre particule. Într-un capitol precedent al cărții de față am dedus legea gravitației, care stabilește că forța de atracție este invers proporțională cu pătratul distanței. Charles A. Coulomb (1736—1806) a demonstrat în 1784 o lege analogă a variației invers proporționale cu pătratul distanței pentru forța dintre sarcinile electrice.

Să considerăm forțele electrice și gravitaționale dintre două particule cu masă de $4 \cdot 10^{-26}$ g, masă intermediară între masele protonului și electronului, situate la distanța r una de alta. Conform legii lui Coulomb, forța electrostatică este dată de e^2/r^2, în care e ($4{,}77 \cdot 10^{-10}$ u.e.s.)[1] este sarcina electrică elementară. Pe de altă parte, conform legii lui Newton, interacțiunea gravitațională e dată de $\frac{GM^2}{r^2}$, în care G ($6{,}67 \cdot 10^{-8}$) este constanta gravitațională, iar M ($4 \cdot 10^{-26}$ g) este masa intermediară. Raportul dintre cele două forțe este $\frac{e^2}{GM^2}$, care este numeric egal cu 10^{40}.

Orice teorie care pretinde să descrie legătura dintre electromagnetism și gravitație trebuie să explice de ce această interacțiune electrică dintre cele două particule este de 10^{40} ori mai mare decît interacțiunea gravitațională. Trebuie să se aibă în vedere că acest raport este un număr pur și rămîne invariabil, indiferent ce sistem de unități se folosește pentru măsurarea diferitelor mărimi fizice. În formulele teoretice, adesea se întîlnesc constante numerice care pot fi deduse pe cale pur matematică. Aceste constante

[1] Unitatea electrostatică (u.e.s) de sarcină se definește ca sarcina care respinge o sarcină egală, situată (în vid) la distanța de 1 cm, cu o forță de o dină.

numerice sînt însă de obicei numere mici. De exemplu, 2π, $\frac{3}{5}$, $\frac{\pi^2}{3}$, etc. Cum se poate deduce matematic o constantă așa de mare cum este 10^{40}?

Acum mai bine de 20 de ani s-a făcut o propunere în această direcție de către celebrul fizician englez, P.A.M. Dirac. El a emis ipoteza că cifra 10^{40} nu este o constantă, ci o variabilă care depinde de timp și de vîrsta universului nostru. Conform teoriei universului în expansiune, universul nostru își are originea acum $5 \cdot 10^9$ de ani sau acum 10^{17} s. Desigur, un an sau o secundă sînt unități foarte arbitrare pentru măsurarea timpului și ar trebui să se aleagă un interval elementar de timp care să se poată deduce din proprietățile fundamentale ale substanței și luminii. Un mijloc rezonabil în acest sens ar fi să se aleagă ca unitate elementară de timp intervalul de timp necesar pentru ca lumina să se propage la o distanță egală cu diametrul unei particule elementare. Întrucît toate particulele elementare au diametre de circa $3 \cdot 10^{-13}$ cm și întrucît viteza luminii este $3 \cdot 10^{10}$ cm/s, această unitate elementară de timp este:

$$\frac{3 \cdot 10^{-13}}{3 \cdot 10^{10}} = 10^{-23} s.$$

Împărțind vîrsta actuală a universului (10^{17} s) la acest interval de timp, obținem $10^{17}/10^{-23} = 10^{40}$, care este de același ordin de mărime ca raportul observat între forțele electrostatice și cele gravitaționale. Așadar, spunea Dirac, raportul mare dintre forțele electrice și cele gravitaționale este caracteristic pentru vîrsta actuală a universului nostru. Cînd universul avea, să zicem, o vîrstă pe jumătate cît cea actuală, acest raport avea o valoare de două ori mai mică. Întrucît există motive serioase de a admite că sarcina electrică elementară (e) nu variază cu timpul, Dirac a conchis că constanta gravitațională (G) este

aceea care descreşte cu timpul şi că această descreştere poate fi pusă în legătură cu expansiunea universului şi cu rarefierea neîncetată a materiei care îl umple.

Aceste concepţii ale lui Dirac au fost criticate ulterior de Edward Teller (creatorul bombei H), care a relevat că variaţia constantei gravitaţionale G ar avea ca rezultat modificarea temperaturii suprafeţei Pământului. În adevăr, descreşterea gravitaţiei ar avea ca efect creşterea razelor orbitelor planetare, care (după cum se poate demonstra pe baza legilor mecanicii) ar varia invers proporţional cu G. Descreşterea gravitaţiei ar mai avea ca rezultat stricarea echilibrului intern al Soarelui, conducînd la o modificare a temperaturii centrului său şi a vitezei reacţiilor termonucleare care produc energie.

Pe baza teoriei structurii interne şi a producerii energiei stelelor, se poate demonstra că luminozitatea[1] L a Soarelui ar varia proporţional cu $G^{7,25}$. Întrucît temperatura suprafeţei Pământului variază cu rădăcina a patra a luminozităţii Soarelui împărţită la pătratul razei orbitei Pământului, rezultă că ea este proporţională cu $G^{2,4}$ sau invers proporţională cu $t^{2,4}$, dacă G variază invers proporţional cu timpul. Admiţînd pentru vîrsta sistemului solar valoarea de trei miliarde de ani, ceea ce părea corect în momentul publicării studiului său, Teller a calculat că în timpul perioadei cambriene (acum o jumătate de miliard de ani), temperatura Pământului trebuie să fi fost cu vreo 50°C peste punctul de fierbere al apei, aşa încît toată apa de pe planeta noastră trebuie să se fi găsit sub formă de vapori supraîncălziţi. Deoarece, potrivit datelor geologice, în acea perioadă de timp exista o viaţă marină bine dezvoltată, Teller a conchis că ipoteza lui Dirac relativă la variabilitatea constantei gravitaţionale nu poate fi corectă.

[1] Luminozitatea unei surse de lumină se defineşte drept cantitatea de lumină pe care o emite în unitatea de timp.

În cursul ultimului deceniu însă, evaluările vîrstei sistemului solar s-au modificat în sensul unor valori considerabil mai mari, iar cifra corectă poate fi aceea de cinci miliarde de ani sau chiar mai mare. În modul acesta, temperatura oceanului primitiv s-ar coborî sub punctul de fierbere al apei și ar face nevalabilă vechea teorie a lui Teller, cu condiția ca trilobiții și moluștele din silurian[1] să fi putut trăi în apă foarte fierbinte. S-ar mai putea veni în sprijinul teoriilor paleontologice prin mărirea vitezei mutațiilor termice în timpul primelor stadii ale evoluției vieții și furnizînd, în timpul perioadelor și mai vechi, temperaturile foarte înalte necesare pentru sinteza acizilor nucleici care, împreună cu proteinele, formează componenții chimici esențiali ai tuturor ființelor vii. Așadar, chestiunea variabilității constantei gravitației rămîne deschisă mai departe.

Gravitația și teoria cuantelor

Legea interacțiunii gravitaționale dintre mase, formulată de Newton, este, după cum am văzut, cu totul similară cu legea interacțiunii electrostatice dintre sarcini, iar teoria cîmpului gravitațional, formulată de Einstein, are multe elemente comune cu teoria cîmpului electromagnetic elaborată de Maxwell. Așadar, e natural să ne așteptăm ca o masă care oscilează să dea naștere unor unde gravitaționale așa cum o sarcină electrică oscilantă produce unde electromagnetice. Într-un articol care a făcut multă vîlvă, publicat în 1918, Einstein a obținut, în adevăr, soluții ale ecuației fundamentale a relativității generalizate, soluții care reprezintă astfel de perturbații gravitaționale ce se propagă prin spațiu cu viteza luminii. Dacă există, undele gravitaționale trebuie să fie purtătoare de energie; dar intensitatea lor sau cantitatea de energie pe care o trans-

[1] Perioadă mai veche din era paleozoică. — *N.T.*

portă este extrem de mică. De exemplu, Pămîntul, în mișcarea sa orbitală în jurul Soarelui, ar emite circa 0,001 W, ceea ce ar avea ca efect „căderea" sa spre Soare cu a milioana parte dintr-un centimetru într-un miliard de ani. Nimeni n-a născocit pînă acum un mijloc de a detecta unde atît de slabe.

Sînt oare undele gravitaționale divizate în pachete discrete de energie sau cuante, cum sînt undele electromagnetice? La această întrebare, care este tot atît de veche ca și teoria cuantelor, a dat un răspuns, în sfîrșit, acum cîțiva ani, Dirac. El a reușit să cuantifice ecuația cîmpului gravitațional și a arătat că energia cuantelor de gravitație sau a „gravitonilor" este egală cu constanta h a lui Planck înmulțită cu frecvența lor, adică aceeași expresie care dă energia cuantelor de lumină sau a fotonilor. Spinul gravitonului este însă dublul spinului fotonului.

Din cauză că sînt atît de slabe, undele gravitaționale n-au nici o importanță în mecanica cerească. Dar n-ar putea, oare, gravitonii să joace vreun rol în fizica particulelor elementare? Aceste fragmente infinit de mici de materie interacționează în diferite moduri cu ajutorul emisiei sau absorbției unor „cuante de cîmp" adecvate. De pildă, interacțiunile electromagnetice (cum ar fi atracția corpurilor cu sarcini de semn contrar) implică o emisie sau o absorbție de fotoni; probabil că interacțiunile gravitaționale au o legătură asemănătoare cu gravitonii. În ultimii cîțiva ani a devenit limpede că interacțiunile materiei se împart în cîteva clase distincte: 1) interacțiuni tari, în care se cuprind și forțele electromagnetice; 2) interacțiuni slabe, cum este „dezintegrarea beta" a unui nucleu radioactiv, în care se emite un electron și un neutrin; 3) interacțiuni gravitaționale, care sînt infinit mai slabe decît cele numite „slabe".

Intensitatea unei interacțiuni depinde de frecvența sau probabilitatea de emisie sau de absorbție a cuantei respec-

tive. De exemplu, un nucleu are nevoie de circa 10^{-12} s pentru a emite un foton. În comparație cu această cifră, dezintegrarea beta a unui neutron necesită 12 min, adică un timp de 10^{14} ori mai lung. Se poate calcula că timpul necesar pentru emiterea unui graviton de către un nucleu este de 10^{60} s sau 10^{53} ani. Această interacțiune se produce de 10^{58} ori mai încet decît o interacțiune slabă.

Dar particulele neutrin au și ele o probabilitate de absorbție, adică de interacțiune, extrem de slabă cu alte tipuri de materie. Ele nu au nici sarcină, nici masă. Încă din anul 1933, Niels Bohr se întreba: „Care este diferența dintre neutrin și cuantele undelor gravitaționale?" În așanumitele interacțiuni slabe, particulele neutrin sînt emise împreună cu alte particule. Ce se întîmplă cu procesele în care intervine numai neutrinul, de pildă, emisia unei perechi neutrin-antineutrin de către un nucleu excitat? Nimeni nu a detectat astfel de evenimente, dar ele se pot întîmpla, poate pe aceeași scară a timpului ca interacțiunea gravitațională. Două perechi de neutrin vor da un spin egal cu doi, adică valoarea calculată de Dirac pentru graviton. Toate acestea sînt, desigur, pure speculații, dar o legătură între neutrin și gravitație este o posibilitate teoretică extrem de interesantă.

Antigravitația

Într-unul din romanele sale fantastice, H.G. Wells descrie cum un inventator englez, Mr. Cavor, a descoperit un material numit „cavorit", prin care forțele gravitației nu pot pătrunde. Așa cum o tablă de cupru sau de fier poate fi folosită ca ecran contra forțelor electrice și magnetice, o foaie de „cavorit" ar servi la ecranarea obiectelor materiale față de forțele gravitației terestre, și orice obiect așezat deasupra unei astfel de foi ar pierde toată greutatea sau cel puțin cea mai mare parte din ea. Mr.

Cavor a construit o cabină sferică mare, înconjurată din toate părțile de obloane de „cavorit", care puteau fi închise sau deschise. Intrînd în cabină într-o noapte cînd Luna se găsea sus pe cer, el a închis toate obloanele dinspre Pămînt și le-a deschis pe cele din direcția Lunii. Obloanele închise au interceptat forțele gravitației Pămîntului, astfel încît cabina, fiind supusă numai forțelor gravitației Lunii, s-a ridicat în spațiu și l-a transportat pe Mr. Cavor spre multe aventuri neobișnuite pe suprafața satelitului nostru.

Cum știm că o invenție imposibilă, este într-adevăr imposibilă? Există o asemănare profundă între legea gravitației universale formulată de Newton, legea interacțiunii sarcinilor electrice descoperită de Coulomb și legea lui Humphrey Gilbert asupra interacțiunii polilor magnetici. Așadar, dacă forțele electrice și magnetice pot fi ecranate, de ce nu s-ar putea face același lucru și cu forțele gravitaționale?

Pentru a răspunde la această întrebare trebuie să examinăm mecanismul ecranării electrice și magnetice, care este strîns legat de structura atomică a materiei. Fiecare atom sau moleculă reprezintă un sistem de sarcini electrice pozitive și negative, iar în metale se găsesc un mare număr de electroni negativi liberi, care se mișcă printr-o rețea cristalină de ioni încărcați pozitiv. Cînd o bucată de material este pusă într-un cîmp electric, sarcinile electrice de semne diferite se deplasează în sensuri opuse și se spune că materialul devine polarizat electric. Noul cîmp electric cauzat de această polarizare are sens opus cîmpului inițial, iar suprapunerea lor îi reduce din intensitate. Un efect similar se produce în cazul ecranării magnetice, deoarece majoritatea atomilor reprezintă niște mici magneți care devin orientați cînd materialul este așezat într-un cîmp magnetic exterior. Și în acest caz, reducerea intensității cîmpului se datorește polarizării magnetice a particulelor atomice.

Polarizarea gravitațională a substanței, care ar face posibilă ecranarea forțelor gravitaționale, ar necesita ca substanța să fie formată din două feluri de particule: unele cu masă gravitațională pozitivă, care ar fi atrase de Pămînt, și altele cu masă gravitațională negativă, care ar fi respinse de acesta. Sarcinile electrice pozitive și negative, precum și cele două feluri de poli magnetici sînt la fel de abundente în natură, dar particule cu masă gravitațională negativă deocamdată nu se cunosc, cel puțin în structura atomilor și moleculelor obișnuite. Așadar, substanța obișnuită nu poate fi polarizată gravitațional, deci nu poate fi îndeplinită o condiție necesară pentru ecranarea forțelor gravitaționale.

Cum stau însă lucrurile cu antiparticulele de care s-au ocupat fizicienii în cursul ultimelor cîteva decenii? Ar fi oare imposibil ca, pe lîngă sarcinile lor de semn contrar, electronii pozitivi, protonii negativi, antineutronii și celelalte antiparticule să aibă și mase gravitaționale negative? La prima vedere s-ar părea că la această întrebare se poate răspunde ușor experimental. Tot ce trebuie făcut este să se vadă dacă un fascicul orizontal de electroni pozitivi sau de protoni negativi provenind de la un accelerator nuclear se încovoaie în jos sau în sus în cîmpul gravitațional al Pămîntului. Întrucît toate particulele produse în mod artificial prin metode bazate pe bombardamentul nuclear se mișcă cu viteze apropiate de aceea a luminii, încovoierea unui fascicul orizontal de către forțele gravitației terestre (fie în sus, fie în jos) este extrem de mică, reprezentînd doar circa 10^{-12} cm (diametrul unui nucleu!) pe kilometru de lungime a traiectoriei. Desigur că s-ar putea încerca să se frîneze aceste particule pînă la viteze termice, așa cum s-a făcut cu neutronii obișnuiți[1].

[1] Vezi Donald J. Hughes, *Povestea neutronului*, apărută în colecția „Science Study Series", 1959.

În experiența cu neutronii, un fascicul de neutroni rapizi a fost trimis într-un bloc moderator și s-a observat că neutronii lenți care ieșeau din bloc aveau aproximativ aceeași viteză pe care o au picăturile de ploaie în cădere. Dar frînarea neutronilor rezultă din ciocnirile cu nucleele materialului moderator, iar moderatoarele bune, cum sînt carbonul sau apa grea, sînt acele substanțe ale căror nuclee au afinitate slabă pentru neutroni și nu îi absorb după un număr de ciocniri succesive. Orice moderator constînd din substanță obișnuită va fi, desigur, o capcană mortală pentru antineutroni, care vor fi anihilați imediat, împreună cu neutronii din nucleele atomice obișnuite. Așadar, din punct de vedere experimental, problema semnului masei gravitaționale a antiparticulelor rămîne deschisă.

Problema rămîne deschisă și din punct de vedere teoretic, deoarece nu posedăm teoria care ar putea prezice legătura dintre interacțiunea gravitațională și cea electromagnetică. Se poate spune numai că dacă vreo experiență va arăta în viitor că antiparticulele au o masă gravitațională negativă, ea ar da o lovitură dureroasă întregii teorii a gravitației formulată de Einstein, dovedind falsitatea principiului echivalenței. În adevăr, atunci, dacă un observator, găsindu-se într-o cameră-Einstein accelerată, ar da drumul unui măr care are masă gravitațională negativă, mărul ar „cădea în sus" (față de nava cosmică) și, privit din exteriorul camerei, s-ar mișca cu o accelerație de două ori mai mare decît aceea a navei cosmice, fără să fie supus acțiunii vreunei forțe exterioare. Așadar, vom fi siliți să alegem între legea inerției descoperită de Newton și principiul echivalenței formulat de Einstein, iar această alegere este, fără îndoială, foarte grea.

INDICE ALFABETIC

Accelerația, calculul infinitezimal și ~, 21, 41, 45
— la ecuator, 56
— Lunii, 31, 32, 37
— negativă a ceasornicelor, 67, 100
— sateliților artificiali, 90
— și orbitele planetelor, 53, 54, 55
— și planele, înclinate ale lui Galilei, 21, 25
— și teoria lui Einstein, 95, 101
Acid dezoxiribonucleic, 7, 8.
— nucleic, 115
Adams, J.C. și Neptun, 74
Alpher, R., 9
An, vîrsta universului în ~, 113—115
Antigravitația, 117 și urm.
Antineutrin, 117
Antineutron, 119, 120
Antiparticule, 119, 120
Antipozi, forma Pămîntului și ~, 13
Apa, ceasornic de ~, 18
— grea ca moderator, 120
Arhimede, 22
Aristarh și forma Pămîntului, 13
Aristotel și cosmologia, 14
Astronaut și accelerația, 92 și urm.
— și îmbătrînirea, 101—103
Atkinson, R. și G. Gamow, 8
Atmosfera, viteza de eliberare și ~, 82—83
— solară, 72
Atomi și antigravitația, 117 și urm.
— și liniile spectrale, 100
Atomi și teoria cuantelor, 110
Atracție, vezi gravitația.
Avioane și vectorii mișcării, 24
Avioane și teoria relativității, 92

Balanța, experiența asupra gravitației cu ~, 35
— lui Cavendish, 33, 34
Bethe, Hans, Gamow și ~, 9
Bohr, Niels, despre neutrin, 117
— Gamow cu ~, 8
— și teoria cuantelor, 110
Boys, C.V., experiența asupra gravitației, 35
Brahe, Tycho, Kepler și ~, 51

Broglie, Louis de, şi teoria cuantelor, 110
Brown, E.W., *Tabelele Lunii*, 73

Calculul diferenţial, 12, 41, 42, 44, 45, 53
Calculul infinitezimal, 12, 36 şi urm., 45, 69, 73
Calculul infinitezimal în mecanica cerească, 36 şi urm., 55
Calculul integral, 12, 22, 41, 42, 44, 45, 47, 69
Calendar, eclipsele şi ~, 75, 76
Calote de gheaţă, orbita Pământului şi ~, 77, 78
Camera închisă şi teoria lui Einstein, 120
Carbonul ca moderator, 120
Căldura solară, 8
Ceasornic atomic, 103
Ceasornice, mersul ~, 67, 98, 100, 102
Cercul artic, viteza la ~, 69
Cavorit, 117, 118
Challis, T. şi Neptun, 74
Cîmp electromagnetic, 110
Clima, orbita Pământului şi ~, 77, 78
Condon E.V. şi particulele alfa, 8
Conservarea momentului cinetic, 68, 69, 70
Constanţa gravitaţională, 112, 113, 114
Continuu spaţiu-timp, 11, 106, 108, 111
Contracţia spaţială, 98
Contracţia riglelor gradate, 99, 103
Coulomb, Charles A. şi sarcinile electrice, 112, 118
Cuplu, 56, 59, 60

Darwin, George şi sistemul Pământ-Lună, 67, 71, 72
Derivate, Leibniz şi ~, 42
Dezintegrarea beta, 117
Dirac, P.A.M., şi vîrsta universului, 113, 114, 116
— şi teoria cuantelor, 116
Direcţia şi vectorii mişcării, 22, 25, 59
Disc în rotaţie, 70, 63, 98, 99
Distanţa, momentul cinetic şi ~, 71
— şi curbarea luminii, 103, 106

Eclipsa şi deviaţia luminii, 95
Ecuator, gravitaţia la ~, 56
Einstein Albert, teoria relativităţii restrînse, 11, 91, 98, 101, 109, 110
Electromagnetism, 110, 112
Energia, fricţiunea mareelor şi pierderea de energie, 65, 66, 67
— racheta şi ~ nucleară, 87, 88, 90
— unde gravitaţionale şi ~, 115
Faraday M., 109
Feenbergt E., 101
Fenomene optice şi principiul echivalenţei, 94

Forța centrifugă și forma Pămîntului, 56
Forța centrifugă și mișcarea Lunii, 56
Foton, 116, 117
Frați, forța gravitației și îmbătrînirea gemenilor, 100, 101, 103
Frecarea aerului, căldura produse de ~, 83

Galilei G., 11, 14, 15, 18, 19, 40, 41, 94
Galle, J.G., descoperirea lui Neptun și ~, 74
Gamow G., biografia lui ~, 7—9
Genetica, Gamov și ~, 7—9
Geodezice, 105, 106
Gilbert, Sir Humphrey și polii magnetici, 118
Giroscop, 57—59
— de aviație 58
Graviton, 116, 117
Gravitația eliberarea de ~, 81 și urm.
— Galilei și ~, 11, 14, 16—18, 33
— Newton și ~, 11, 14, 26, 32, 33, 36, 46, 52, 55, 56, 61, 62, 71, 73, 109, 118
— probleme nerezolvate ale ~, 109 și urm.
— și rotația Pămîntului, 56, 61, 72
— și teoria lui Einstein, 11, 91 și urm., 109, 110
Greutatea și căderea liberă, 14—18, 40
Gropi gravitaționale, 83, 85
Gurney, R.W. și particulele alfa, 8

Heisenberg, Werner și teoria cuantelor, 110
Herschel, William și Neptun, 74
Hiparh și precesia, 61
Houtermans, F. cu Gamow G., 8
Hughens, Donald J., 119

Interacțiunea, perturbații planetare și ~, 73
Ioni și antigravitația, 118

Jeffreys, Sir Harold și fricțiunea mareelor, 66
Jupiter, distanța pînă la ~, 51
— perioada de rotație a lui ~, 52

Kepler Johannes și mișcările plantelor, 51, 55, 73

Laplace, Pierre Simon, 73
Lagrange, Joseph Louis, 73
Legea de variație cu inversul pătratului distanței, 32, 33, 96
Leibniz, Gottfried, 41, 42, 44
Leverrier, I.I., și Neptun, 74
Linia dreaptă și spațiul curb, 103, 104, 106
Lowel, Percival și Pluto, 75

Lucru mecanic, 48, 50
Lumina, curbarea ~, 95, 103, 106
— cuante de ~, 116
— solară, 8
— şi orbita Pământului, 78
Luminozitate, 114
Luna, calculele lui Newton asupra gravitaţiei ~, 29, 30
— eclipsele de ~, 75
— fantezia cavoritului, 117, 118
— fricţiunea mareelor şi ~, 62
— şi mareele lunare, 63, 65
— şi precesia Pământului, 61, 72, 76
— rachete spre ~, 85
Lungimea vectorilor mişcării, 22, 59

Magellan, Ferdinand, 13,
Magnetism, 109
Maree, 62 şi urm., 70, 72
Marte, distanţa, perioada de rotaţie, 51, 52
Marte, potenţialul gravitaţional şi ~, 83, 85
Marte, rachetă spre ~, 83, 85
Marte, şi triunghiul teoretic, 105
Masa, momentul cinetic şi ~, 69, 70, 71
— oscilantă şi undele gravitaţionale, 116
— potenţialul gravitaţional şi ~, 83
Masa şi viteza de eliberare, 82
Maxwel, James Clerk, teoria lui Einstein şi ~, 110, 115
Mecanica cerească, 73 şi urm.
Mecanica ondulatoare, Gamow şi ~, 8
Mercur, distanţa, perioada de rotaţie, 51, 52
— potenţialul gravitaţional şi ~, 83
— poziţia în timp a lui ~, 66
— precesia axei lui ~, 108
Michelson, A. A. şi deformaţia Pământului, 65
— şi viteza luminii, 65
Milankovici, M. şi perioadele glaciale, 78
Mişcarea, vezi şi acceleraţia, 45, 48, 51, 53, 54, 57, 61, 71
— orbitele planetare, rotaţia, viteza, 51, 55, 63, 74
— suprapunerea ~, 22, 28
— principiul rachetelor cu mai multe trepte şi ~, 87
Modelul în formă de picătură pentru nuclee, 8
Mutaţii termice, teoria lui Dirac şi ~, 114

Neptun, descoperirea lui ~, 74
Neutrin, 116
Neutron, 8, 9, 119
Newton, Sir Isaac, 11, 26, 28, 36, 41, 45, 51, 52, 53, 56, 91
— şi calculul infinitezimal, 12, 36 şi urm., 45
— şi orbitele planetelor, 51, 53, 55

— şi rotaţia Pămîntului, 61
Nuclee, emisii ale ~ care se dezintegrează, 8, 116
— ale elementelor grele, 8
— teoria cuantelor şi ~, 110

Oppolzer, Theodor von şi eclipsele, 75
Optica, lumina şi legea fundamentală a ~, 99
Orbite planetare, 48 şi urm., 51 şi urm., 114
— ca linii geodezice, 106
— perturbaţii ale ~, 76
Originea elementelor chimice, 8

Paleontologie şi temperaturile oceanului, 115
Particule elementare, 112, 116
Patinatori şi momentul cinetic, 70
Pămîntul ca o sferă care se roteşte, 11, 13, 56, 57, 61
Pămîntul, clima ~, 77
— credinţe vechi despre ~, 13, 14
— eclipsele şi istoria ~, 75
— eliberarea de gravitaţie ~, 118
— mărul, Luna şi ~, 26, 32, 36
— perturbaţii ale orbitei ~, 76
— şi distanţele planetelor, 51
Perrin J., 58, 59
Planck, Max, 110, 116
Planete, perturbaţiile ~, 73—75
— rachete spre diferite planete, 83—87
Pluto, descoperirea lui ~, 75
Poli, momentul cinetic şi ~, 69
— magnetic, 56, 69
Potenţial gravitaţional, 50, 81, 83, 100
Precesia axei orbitei lui Mercur, 108
Principiul echivalenţei, 94, 97, 120
Procese termonucleare, 8
Proiectil de artilerie lansat spre cosmos, 82
— balistic, vezi racheta
Proton şi legea lui Coulomb, 112

Gamow şi ~, 8
Pseudogravitaţia, 92
Ptolemeu, cosmologia lui ~, 14

Rachetă, îmbătrînirea omului în ~, 100 şi urm.
Rachetă, eliberarea ~ de sub influenţa gravitaţiei, 81 şi urm.
Rachetă, pseudogravitaţia în ~, 92
Raza Pămîntului, 32, 64, 82
Recesia Lunii 71, 72
Relativitate, teoria generalizată, 91, 115
Respingerea şi forţa centrifugă, 95—97
Revoluţia, vezi rotaţia

Riglă, contractarea ~, 98
Rotația și momentul cinetic, 67, 70
Rotația Pământului, 56, 57, 66, 67, 71
Rotația Pământului, perturbațiile și clima, 78 și urm.
Rotația, perioada de ~, 31
Rutherford Ernest, Gamow cu ~, 8

Sarcină electrică, 115, 117, 119
Sateliți, 81
— ceasornice atomice în ~, 103
Sateliții lui Newton, 28
— planetelor, 75
— propulsia ~, 83 și urm.
Saturn, 72
Schrödinger, E. și teoria cuantelor, 110
Singer, S.F., experiența lui, 103
Sfera în experiențele lui Cavendish, 35
— într-o rachetă accelerată, 92—94
Soarele și curbarea luminii, 95—106
— ceasornic pe suprafața ~, 100
— eclipsele de ~, 75, 95
— și mareele, 63, 72
— și orbitele planetelor, 51 și urm.
— și precesia Pământului, 76, 61
— și zborul rachetelor, 83, 85, 90
Spin, 116, 117
Suess, Hans și curbele de climă, 78

Taylor, Sir Geoffrey și fricțiunea mareelor, 66
Teller, Eduard și temperatura Pământului, 114
Teorii clasice ale gravitației 13—15
Teoria relativității, 91
Teoria spațiului curb, 104
Teoria unitară a cîmpului, 111
Teoria universului în expansiune, 113 și urm.
Timp, unitate elementară de ~, 113
— și mișcarea 20, 21, 30, 37 și urm.
— și mișcarea planetelor, 51, 54, 55
Tombaugh, C.W. și Pluto, 75
Triunghiuri pe spațiul curb, 104—106
Trilobiți și temperatura oceanului, 115

Ulam, Stanislaw și propulsia rachetelor, 88
Unde electromagnetice, 115
Unde gravitaționale, 115, 117
Unde luminoase, vezi lumina
Univers, vîrsta ~, 113
Uranus, 74
Urey, Harold și temperatura oceanului, 79—80

Vapoare și teoria relativității, 91—92
Vas portavion și vectorii mișcării, 24
Vectori, 22—24, 47, 59
Venus, distanța, perioada de rotație, 66
Venus, potențialul gravitațional, 87
Venus racheta spre ~, 87
Venus și triunghiul teoretic, 105
Viteza, vezi și accelerația, 20, 33, 40, 41, 42, 44, 53, 55, 63; 95, 98, 101, 119
Viteza căderii libere, 15, 20
Viteza de eliberare, 81, 82
Viteza în calculul infinitezimal și integral, 20, 21, 40, 41, 42, 44, 53
Viteza în suprapunerea mișcărilor, 22 și urm.
Viteza, moment cinetic și ~, 67, 69
Viteza, prima ~ cosmică, 82
Viteza unghiulară, 31, 59, 60
Verne, Jules, fantezia cosmică a lui ~, 82

Wells, H.G., fantezia lui ~ despre gravitație, 117

CUPRINSUL

Biografia autorului 7
Prefață 11
Capitolul I
CUM CAD OBIECTELE 13
Capitolul II
MĂRUL ȘI LUNA 26
Capitolul III
CALCULUL INFINITEZIMAL 36
Capitolul IV
ORBITELE PLANETELOR 48
Capitolul V
PĂMÎNTUL E UN FEL DE SFÎRLEAZĂ CARE SE ROTEȘTE 56
Capitolul VI
MAREELE 62
Capitolul VII
IZBÎNZILE MECANICII CEREȘTI 73
Capitolul VIII
CUM SE POATE SCĂPA DE GRAVITAȚIE 81
Capitolul IX
TEORIA GRAVITAȚIEI ELABORATĂ DE EINSTEIN 91
Capitolul X
PROBLEME DE GRAVITAȚIE NEREZOLVATE 109
GRAVITAȚIA ȘI TEORIA CUANTELOR 115
ANTIGRAVITAȚIA 118
Indice alfabetic 121

Redactor: MARIA BORICEAN
Tehnoredactor: GHEORGHE POPOVICI

Dat la cules: 14. 12. 1965. Bun de tipar: 02. 03. 1966. Tiraj: 13 000 ex. *Hîrtie scris: II A 63 g/m². Format: 54×84/16. Coli editoriale: 9,39. Coli de tipar: 8. A.: 11 666. Indici de clasificare zecimală: pentru bibliotecile mari: 531.5, pentru bibliotecile mici: 53.*

Tiparul executat sub comanda nr. 8718 la Întreprinderea Poligrafică Cluj, str. Brassai nr. 5—7. — Cluj — Republica Socialistă România